

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-148-05

虞城站特高压直流输电工程 换流阀水冷系统节流孔板设计计算

宗 斌¹ 严鹏航^{2,3} 任海莹^{2,3} 李 冬^{2,3}

1. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司 南京 211106;
2. 北京国电富通科技发展有限公司 北京 100070;
3. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司 南京 211106)

【摘要】 换流阀水冷系统因其固有的结构设计和散热需求, 系统容易发生因压降波动, 流量陡变等参数变化导致装置误动作的现象。以新建白鹤滩-江苏±800kV 特高压直流输电工程虞城站换流阀水冷系统各项参数指标为基准, 基于孔板计算公式进行理论计算, 同时利用一维软件 Flowmaster 建立模型进行仿真分析, 并将二者结果对比得出孔径推荐值。按照规范设计多孔节流孔板, 最后通过该水冷系统等比例装置进行试验分析, 绘制不同节流孔板结构下, 系统进阀总流量随着三通阀阀门开度的波动曲线图。试验结果表明, 加装多孔节流孔板(12 孔, 孔径 40mm)后的进阀总流量波动相较未加装节流孔板状态, 波动比值降低为 6.01%, 下降幅度超过一半, 效果显著。最终取节流孔板最优设计应用于虞城站, 为后续新建工程及工程改造提供理论和运行依据。

【关键词】 换流阀水冷系统; 节流孔板; 三通阀; Flowmaster
中图分类号 TH137.5 文献标识码 A

Design and Calculation of Throttle Orifice Plate in Converter Valve Cooling System of Yucheng Station UHVDC Transmission Project

Zong Bin¹ Yan Penghang^{2,3} Ren Haiying^{2,3} Li Dong^{2,3}

- 1.State Grid Jiangsu Electric Power Co.Ltd EHV Branch Company, Nanjing, 211106;
- 2.Beijing Guodian Futong Science,and Technology Development Co., Beijing, 100070;
- 3.NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing, 211106)

【Abstract】 Due to the inherent structural design and heat dissipation requirements of the converter valve cooling system, The system is prone to misoperation caused by parameter changes such as pressure drop fluctuation and sudden flow change. The parameters of the converter valve cooling system of the Yucheng Station of the newly built Baihetan-Jiangsu ±800kV UHVDC transmission project are used as the benchmark. Theoretical calculation based on the orifice calculation formula, and the one-dimensional software Flowmaster is used to establish a model for simulation analysis, The results of the two are compared to obtain the recommended orifice size. The multi-hole orifice plate is designed according to the specification, and finally the test analysis is carried out through the proportional device of the water cooling system, Draw the fluctuation curve of the total flow of the system inlet valve with the valve opening of the three-way valve under different throttling orifice plate structures. The test results show that the fluctuation ratio of the total flow rate of the inlet valve after adding the orifice plate (12 holes 40mm) is

基金项目: 海上柔直平台海水综合冷却技术研发及应用

作者(通讯作者)简介: 宗 斌(1984-), 男, 本科, 中级工程师, E-mail: zongb@js.sgcc.com.cn

收稿日期: 2022-12-01

reduced to 6.01% compared with the state without the orifice plate installed, and the reduction range is more than half, and the effect is remarkable. Finally, the optimal design of the throttling orifice plate is applied to the actual project, which provides the theoretical and operational basis for the subsequent new construction and engineering transformation.

【Keywords】 converter valve cooling system; throttle orifice plate; three-way control valve; flowmaster

0 引言

高压直流输电工程换流阀水冷系统是换流站特有的核心辅助设备,其机械回路和控制保护回路均比较复杂,其中进阀温度、压力及流量均一性要求较高,波动较大易危及高压直流输电系统的安全运行^[1]。其中进阀温度主要依赖电动三通阀调节系统外冷流量来实现温度控制,但由此会导致系统支路压阻变化。如图1所示,电动三通阀置于主循环冷却水回路室外换热设备进水侧,可调节室外换热设备的冷却水流量比例,但由于室外换热设备及其较长连接管路存在明显压降,同时根据工程实测数据反馈,电动三通阀工作时进阀压力及流量存在陡变的现象,严重影响系统的安全稳定运行。

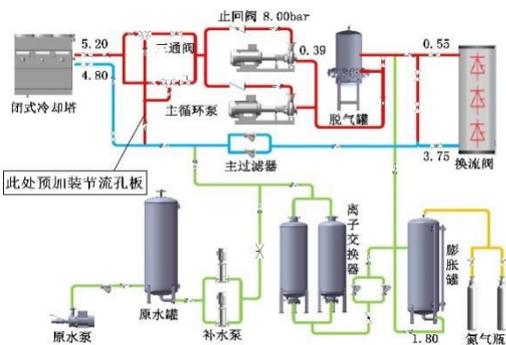


图1 白-江工程换流阀水冷系统节点压力示意图

Fig.1 Schematic diagram of node pressure of the converter valve cooling system in Bai-jiang project

在发电厂及化工行业工程建设中,管道的前后压差较大时,往往采用加设节流孔板的方式,其原理是:流体在管道中流动时,孔板导致的局部阻力可使流体的能量损耗,压力降低,流量降低,达到降低流体压力的目的,在热力学称为节流现象^[2]。节流孔板的选型需要经过合理的设计计算,避免出现气蚀、管道震颤等现象,影响系统稳定运行。陈莹等研究了气蚀现象的发生机理,开展液体节流孔板压降、级数及孔径的设计计算^[2];谢辉等探究了节流孔板开孔形状及结构对管道压降效果及振动辐射噪声的影响^[3];杨杰等应用计算流体力学软件,对不同结构参数的孔板流量计进行数值模拟

^[4];目前国内外各换流阀水冷系统从未开展加装节流孔板的研究,我方根据阀冷系统的多年运行经验及数据支撑,开展此项研究,可优化系统运行工况,提升换流站工程质量。

本文以新建白鹤滩-江苏±800kV特高压直流输电工程虞城站换流阀水冷系统各项参数指标为基准,基于孔板计算公式进行理论计算,同时利用一维软件 Flowmaster 进行仿真分析,并将二者结果对比得出孔径推荐值,最后通过该水冷系统等比例样机进行试验分析,取孔径最优值应用于实际工程中。

1 节流孔板理论计算分析

1.1 节流孔板前后压差 ΔP 计算分析

如图1所示,阀冷系统介质在主泵的驱使下进行循环,当三通阀开度为100%时,介质流路路径为三通阀-较长管路-冷却塔-过滤器;当三通阀开度为0%时,介质流路路径为三通阀-极短管路-过滤器。对比可知,随着三通阀开度的变化,两条路径的压降差距较大,造成了系统压力及流量波动,故需通过加设节流孔板的方式进行有效控制,设计节流孔板前后压差为冷却塔+较长管路压降之和。

其中冷却塔压降根据厂家选型报告可知:

$$\Delta P_{\text{冷却塔}} = 47.6 \text{ kPa} \quad (1)$$

较长管路压降依据虞城站换流阀冷却系统设计可知:管路采用 DN250 规格,其中直管段管长约 133.1m,包含 DN250 长半径弯头 8 个。

依据 GB 50015-2003 建筑给水排水设计规范沿程水头损失计算公式:

$$i = 105 C_h^{-1.85} d_j^{-4.87} q_g^{1.85} \quad (2)$$

式中: i 为管道单位长度水头损失, kPa/m; d_j 为管道计算内径, m; q_g 为设计流量, m^3/s ; C_h 为海澄威廉系数(不锈钢管取130)。

局部阻力损失计算公式:

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中： ξ 为局部阻力系数； v 为管内流速，m/s； g 为重力加速度，m/s²。

则较长管路压降计算可得：

$$\Delta P_{\text{管路}} = 34.17 \text{ kPa} \quad (4)$$

最终节流孔板前后压差为：

$$\Delta P = \Delta P_{\text{冷却塔}} + \Delta P_{\text{管路}} = 81.77 \text{ kPa} \quad (5)$$

1.2 节流孔孔径计算

依据DLT 5054-2016火力发电厂汽水管道设计规范水道上的节流孔径计算公式：

$$d_k = \sqrt{\frac{421.6G}{\sqrt{\rho\Delta P}}} \quad (6)$$

式中： d_k 为节流孔板的孔径，mm； G 为通过孔板的流量，t/h； ρ 为水的密度，kg/m³； ΔP 为孔板前后压差，MPa。

理论计算可得节流孔板的孔径为：

$$d_k \approx 158 \text{ mm} \quad (7)$$

2 基于Flowmaster仿真软件计算分析

2.1 软件介绍及参数设置

Flowmaster软件是世界一流的一维热流体系统仿真软件，对于各种复杂的流体系统，工程师可利用Flowmaster快速有效地建立精确的系统仿真模型进行瞬态/稳态求解，并进行压力、流量、温度、流速等参数的计算分析^[5]。

参数设置：

泵Pump：流量535m³/h=148.611kg/s及为进阀总流量、扬程80m、功率142kW、如图2所示，Suter Head-Torque Curve按KSB厂家提供曲线导入^[6]。

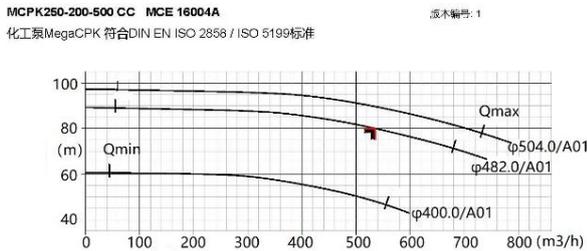


图2 MCPK250-200-500泵流量扬程曲线

Fig.2 MCPK250-200-500 Pump flow head curve

管路Cylindrical Rigid：直径0.267m，长度依照实际布置测量值，绝对粗糙度依据软件推荐值取0.025mm。

冷却塔模块：水力直径0.267m，压降为

0.476bar，根据局部阻力系数计算公式^[7]可得Loss Coefficient为13.5。

换流阀模块：水力直径0.267m，压降根据厂家设计报告为4.5bar，根据局部阻力系数计算公式可得Loss Coefficient为127。

三通阀模块：水力直径0.267m，如图3所示，将连杆执行机构控制的蝶阀简化为V13/V14组成，由阀门控制器调节。

节流孔Orifice：孔板外径水力直径0.267m，厚度0.01m。

2.2 仿真模型搭建及计算

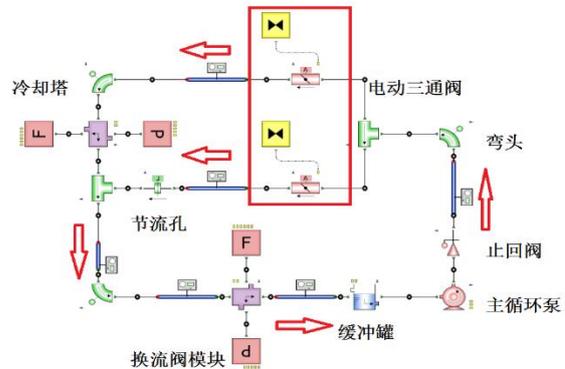


图3 换流阀水冷系统节流孔板计算仿真模型

Fig.3 Calculation and Simulation Model of Throttle orifice of the converter valve cooling system

换流阀水冷系统节流孔板计算仿真模型依据虞城站阀冷系统工艺流程图搭建如图3所示，通过阀门控制器Valve Opening可控制蝶阀阀门开度，调节流经冷却塔及节流孔回路的流量，实现稳/瞬态控制及求解。

表1 不同回路流量及压降对比

Table 1 Comparison of flow rate and pressure drop in different circuits

参数	方案	冷却塔回路	节流孔回路
	设计值	仿真值	仿真值
进阀总流量	148.611	148.518	148.404
kg/s			
冷却塔压降/bar	0.476	0.476	0.802
管道压降/bar	0.342	0.329	
换流阀压降/bar	4.500	4.480	4.477

首先调整三通阀开度为100%，此时介质流路径为冷却塔回路。由上表仿真分析计算后可知，以方案设计值为基准值，仿真模型中冷却塔回路仿真值各参数计算误差≤3.8%，表明模型建立有效，

边界参数设置精确, 仿真结果计算可靠。

然后调整三通阀开度为0%, 此时介质流通道径为节流孔板回路。通过不断调节节流孔板内径规格尺寸, 促使该回路流量压降参数与冷却塔回路趋于平衡。最终计算得出节流孔板孔径为140.5mm时可达最优节流效果, 此时相较于冷却塔回路, 节流孔板支路流量及压力波动控制在0.5%以内, 效果显著。

3 等比例系统试验分析

3.1 节流孔板选型设计

依据HGT 20570.15-1995管路限流孔板的设置节流孔板分类及选型要点:

液体:

(1) 当液体压降小于或等于2.5MPa时, 选择单板孔板。

(2) 当液体压降大于2.5MPa时, 选择多板孔板, 且使每块孔板的压降小于2.5MPa。

孔数的确定:

(1) 管道公称直径小于或等于150mm的管路, 通常采用单孔孔板; 大于150mm时, 采用多孔孔板。

(2) 多孔孔板的孔径 (d_0), 一般可选用12.5mm, 20mm, 25mm, 40mm。

由此可知, 本系统工况节流孔板液体压降远小于2.5MPa, 同时管道采用DN250标准管, 公称直径大于150mm, 考虑流动噪声影响, 故采用单板多孔孔板^[8]。

多孔孔板的孔数计算公式如下:

$$N = d^2 / d_0^2 \quad (8)$$

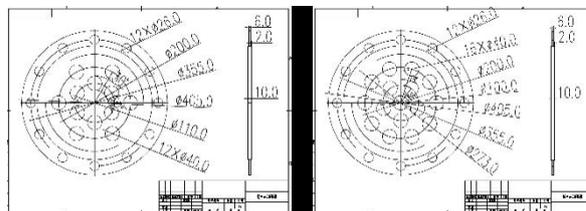
式中: N 为多孔限流板的孔数, 个; d 为单孔限流孔板的孔径, m; d_0 为多孔限流孔板的孔径, m。

结合理论计算及仿真分析结果, 基于换流阀水冷系统冗余量要求, 考量节流管道振动及辐射噪声影响, 多孔孔板的孔径选用40mm^[9], 节流孔板选型设计如表2所示。

表2 节流孔板选型计算表

Table 2 Calculation table for throttle orifice selection			
节流孔板的孔径设计来源	单孔孔板	多孔孔板	多孔孔板
	孔径	孔径	的孔数
	d/mm	d_0/mm	$N/个$
理论计算值	158.0	40	16
仿真计算值	140.5	40	12

如图4所示, 节流孔板多孔均匀布置, 采取半圆角型节流孔板结构, 可有效防止气蚀的产生, 降低流动噪声^[10]。



(a) 节流孔板结构 (12孔) (b) 节流孔板结构 (16孔)

图4 节流孔板结构设计图

Fig.4 Structural design drawing of throttle orifice plate

3.2 孔板安装及试验数据分析

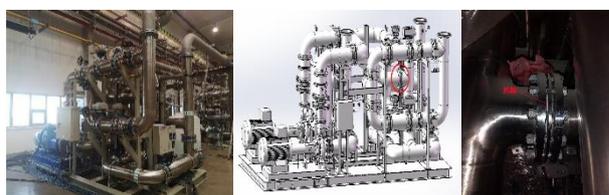


图5 换流阀水冷系统节流孔板安装位置

Fig.5 Installation position of throttle orifice plate of the converter valve cooling system

如图5所示, 安装节流孔板于阀冷系统指定位置, 通过调节阀门开度模拟现场工况。分别对比未加装节流孔板、加装节流孔板 (12孔/16孔) 的系统流量状态。同时考虑系统运行数据呈波动态势, 故取阀冷系统稳定工况下的平均流量记录并分析。

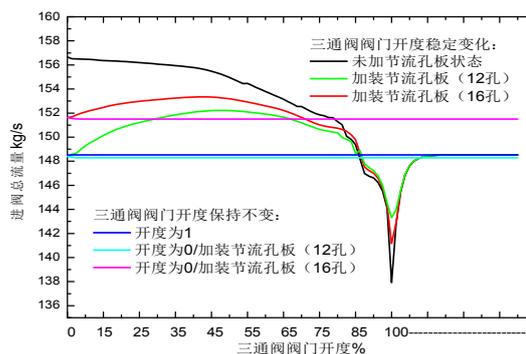


图6 进阀总流量随三通阀开度变化趋势图

Fig.6 The trend diagram of the total flow of the inlet valve with the opening of the three-way valve

如图6所示为加装不同节流孔板, 换流阀水冷系统进阀总流量随三通阀开度变化趋势图。明显可以看出加装节流孔板后, 系统流量曲线波动趋势趋于稳定。

如表3所示为进阀总流量波动记录表，对比可知，加装节流孔板（12孔）后的进阀总流量波动相较未加装节流孔板状态，波动比值降低为6.01%，下降幅度超过一半，效果显著。白鹤滩-江苏±800KV特高压直流输电工程虞城站换流阀水冷系统最终采用节流孔板（孔径40mm、孔数12个）选型设计。

表3 进阀总流量波动记录表

Table 3 Record table of total flow fluctuation of inlet valve

进阀总流量记录	未加节流孔板	加装节流孔板（16孔）	加装节流孔板（12孔）
最大值kg/s	156.657	153.346	152.222
最小值kg/s	137.917	141.16	143.311
波动值kg/s	18.74	12.186	8.911
波动比值	12.63%	8.21%	6.01%

4 结论

Flowmaster可快速有效地建立精确的系统仿真模型进行瞬态/稳态求解，并进行换流阀水冷系统压力、流量、温度、流速等参数的计算分析。本文通过建立白鹤滩-江苏特高压直流输电工程虞城站换流阀水冷系统仿真模型，分析三通调节阀阀门开度对进阀总流量、压力等参数的影响，仿真结论与以往项目工程经验及波动趋势相符，证明仿真模型建立可靠；同时结合理论计算和仿真分析得出节流孔板设计参数，具体实施于虞城站换流阀水冷装置中，通过同比例系统试验比较，可明显观察到加装节流孔板（12孔，40mm）后，系统流量曲线趋于平缓，波动比值降低为6.01%，下降幅度超过一

半。基于阀冷系统外冷结构压降值设计加装的节流孔板可明显优化系统运行稳定性，为后续新建工程及工程改造提供了理论和运行依据。

参考文献：

- [1] 严喜林,张怿宁,崔鹏飞,等.高压直流换流阀冷却系统进阀温度保护定值整定方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,(4):140-145.
- [2] 陈莹,王永佳,李越,等.液体节流孔板的设计计算[J].中国石油和化工标准与质量,2020,(18):122-123.
- [3] 谢辉,戈禧芸,刘建,等.不同规格节流孔板的节流和声学特性[J].东北大学学报,2020,41(4):588-593.
- [4] 杨杰,邓德兵,赵清森,等.孔板厚度对核电站给水流量测量精度影响的数值模拟[J].科学技术与工程,2021,21(6):2328-2333.
- [5] 姜渊博.基于FLOWMASTER的调车机车冷却系统设计及仿真计算分析[D].大连:大连交通大学,2020.
- [6] 高腾麟,刘宇,徐小俊.发动机高效冷却系统NEDC循环节能效果仿真分析[J].车用发动机,2020,(3):64-70.
- [7] 王奇峰.增压中冷汽油机热管理系统试验与仿真分析[D].吉林:吉林大学,2013.
- [8] Testud P, Moussou P, Hirschberg A, et al. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007,23(2):163-189.
- [9] 谢羿,奚冬,刘建,等.节流板孔直径及流量对核级管道流致噪声的影响[J].东北大学学报（自然科学版）, 2020,41(8):1140-1147.
- [10] 杜晓东,王晗,王贵龙,等.节流孔板的流场噪声耦合分析及改型设计[J].船舶工程,2018,40(3):29-32,40.

（上接第 128 页）

参考文献：

- [1] 彭思迪.通信网络能耗分析与节能技术应用[J].中国信息化,2022,(8):73-74.
- [2] 周海东,黄翔,屈元.蒸发冷却空调在通信机房（基站）中的应用探讨[J].洁净与空调技术,2011,(3):40-43.
- [3] 范坤,黄翔,宋姣姣,等.管式间接-直接蒸发冷却空气处理机组在通信机房中的应用[J].暖通空调,2013,43(S1): 253-257.
- [4] 黄翔,周海东,范坤,等.通信机房应用直接蒸发冷却空调方式的优化及节能分析[J].暖通空调,2013,43(10):

28-34.

- [5] 吴磊,黄翔,金洋帆,等.兰州某地铁站直接蒸发冷却设备实测与分析[J].制冷与空调,2021,35(2):249-253.
- [6] 强天伟,沈恒根.直接蒸发冷却空调工作原理及不循环水喷淋填料分析[J].制冷与空调,2005,(2):62-65.
- [7] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [8] 吕静,黄佳豪,徐昊东,等.露点蒸发冷却装置性能评价指标的研究[J].制冷学报,2021,42(1):126-133.
- [9] YD/T 1821-2018,通信局（站）机房环境要求与检测方法[S].中华人民共和国工业和信息化部,2018.