

梨园水电站主变技术供水国产组合式减压阀噪声优化

龙帅成¹, 张露¹, 康强²

(1. 云南华电金沙江中游水电开发有限公司梨园发电分公司, 云南 丽江 674100;

2. 湘潭中基电站辅机制造有限公司, 湖南 湘潭 441110)

摘要: 水电站主变技术供水 ZJY46H 组合式减压阀, 内部的定常流体流动为高强度的湍流, 湍流状态下流场中出现许多旋涡, 湍流场中的物理量出现随机的不规则脉动的特征。针对小压差小流量的减压阀降噪套筒精准消能减压, CFD 数值模拟网格划分采用 Proximity and Curvature, 强化降噪套筒网格精度与曲率有实际应用效果。通过采用 3D 建模、网格划分、CFD 数值模拟仿真对机组主变技术供水减压阀常用工况、高压差工况和小压差工况进行多工况模拟仿真, 确认减压阀运行噪声, 得出减压阀降噪方案。最终将机组主变技术供水减压阀运行噪声下降到 79.6~81.4 dB。

关键词: CFD 数值模拟仿真; 减压阀降噪; 网格 Proximity and Curvature 应用; 单阀二级减压消能

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1672-5387(2025)10-0117-07

DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.202510.027

0 引言

梨园水电站工程属一等大(1)型工程, 以发电为主, 兼顾防洪、旅游等综合效益。电站装机容量 2 400 MW (4×600 MW)^[1]。主变压器采用电磁感应原理将水轮发电机发出的电能由发电机低电压大电流转化为高电压小电流传输至电力系统。主变压器工作时产生大量热量, 通过冷却油与铜管间接传递给减压阀, 减压消能后的冷却水, 一般排到电站尾水。主变压器冷却水主要特点为扬程高、流量小和压力稳定。

梨园水电站的每台机组主变压器技术供水采用湘潭中基 ZJY46H-25P DN200 组合式减压阀 2 台, 一用一备; 常用运行工况进口压力为 1.16 MPa, 出口压力为 0.55 MPa, 流量为 220 m³/h, 运行噪声为 87 dB。针对小压差小流量的减压阀降噪套筒精准消能减压, CFD 数值模拟首次网格划分采用 Proximity and Curvature, 强化降噪套筒网格精度与曲率有实际应用效果; 将减压阀运行噪声控制范围为 ≤ 82 dB。

1 原 ZJY46H 型组合式减压阀简介

ZJY46H 组合式减压阀的工作原理是由反馈系

统上的控制阀与射流泵控制调节腔压力, 使压力调节腔的压力与主弹簧压力形成平衡。

由于主弹簧压力不受进口压力 P_1 的影响, 所以当进口压力 P_1 和流量变化时, 总能迅速调节主弹簧压力与压力调节腔的压力的平衡, 使出口压力 P_2 和流量保持稳定^[2], 如图 1 所示。

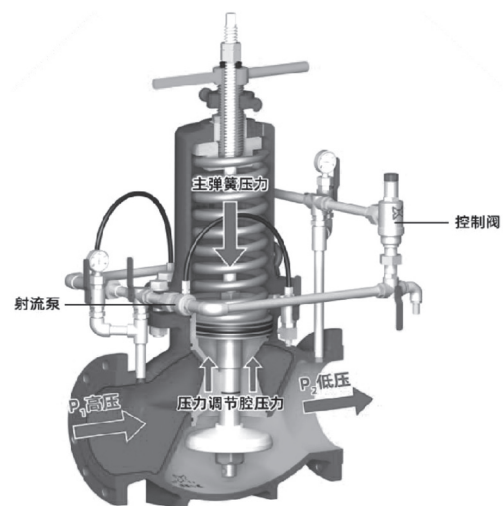


图 1 ZJY46H 型组合式减压阀工作原理图

收稿日期: 2025-05-30

作者简介: 龙帅成(1992-), 男, 工程师, 从事机械技术管理、检修管理、项目管理工作。

2 研究目的与重难点

2.1 研究目的

针对主变技术供水 ZJY46H 型 DN200 组合式减压阀运行噪声过高产生的噪声污染问题,梨园水电站与湘潭中基联合研究减压阀产生噪声的机理。通过现场调研、3D 建模、网格划分、CFD 数值模拟仿真得出多种运行工况结论;根据结论设计最适合水电站主变技术供水减压阀降噪方案。

2.2 重难点

机组主变技术供水减压阀降噪重难点为降噪套筒精准消能减压。减压阀常用运行工况进口压力为 1.16 MPa,出口压力为 0.55 MPa,流量为 220 m³/h。减压阀进口压力与出口压力的压差为 0.61 MPa,要实现减压降噪,须设计降噪套筒消能 0.2~0.25 MPa。当降噪套筒 CFD 数值模拟网格划分精度与曲率误差较大时,过与不及的减压消能都会直接影响减压阀降噪效果。因此降噪套筒 CFD 数值模拟网格划分采用 Proximity and Curvature,强化降噪套筒网格精度与曲率,保证降噪套筒精确消能 0.2~0.25 MPa。

3 CFD 数值模拟仿真实理论与参数模型选择

3.1 CFD 数值模拟仿真实理论

ZJY46H 型组合式减压阀内部的流动为高强度的湍流,湍流状态下流场中出现许多旋涡,湍流场中的物理量出现随机的不规则脉动的特征。流动诱导噪声研究的前提需要对流场进行准确的数值计算,尽可能捕捉流场中存在的旋涡及压力脉动,目前流场数值计算分为直接和间接数值模拟两种。其中直接数值模拟虽然对流场的模拟最精确,但是该方法计算量过大,耗时过长,较难用于工程问题,做理论研究也不方便。工程上主要利用间接方法,较为常用的有 Reynolds 平均法和大涡模拟。大涡模拟在进行湍流模拟时,将大于网格尺度湍流和小尺度涡分别采用不同的方法进行模拟。大涡模拟的本质是介于直接法和间接法之间的一种模拟方法。相对于直接数值模拟它更节约计算资源,对于间接模拟其弥补了 Reynolds 平均法所疏漏的非稳态。虽然大涡模拟能够捕捉流场的细节,但计算资源的消耗仍然非常高。工程上广泛采用计算资源相对较小且满足计算精度的 Reynolds 平均法^[3]。

3.2 参数模型选择

参数模型选择见表 1^[4]。

表 1 参数模型选择

名称	模型 / 条件
湍流模型	k- ω SST 模型
进口边界条件	压力边界条件
出口边界条件	压力边界条件
声场模型	Broadband Noise Sources (宽频噪声模块)
空化模型	Schnerr-Sauer 模型
壁面	No-slip (无滑移)、Smooth (光滑壁面)
网格	Proximity and Curvature

4 减压阀 CFD 数值模拟运行工况

梨园水电站机组主变技术供水 ZJY46H-25P DN200 组合式减压阀运行工况进口压力为 1.05~1.28 MPa,出口压力为 0.55 MPa,流量为 220 m³/h;其中最低进口压力为 1.05 MPa,常用进口压力 1.16 MPa,最高进口压力为 1.28 MPa。CFD 数值模拟工况划分为常用工况、小压差工况和高压差工况,如表 2 所示。

表 2 CFD 数值模拟运行工况

工况	进口压力 /MPa	出口压力 /MPa	流量 /m ³ /h
常用工况	1.16	0.55	220
高压差工况	1.28	0.55	220
小压差工况	1.05	0.55	220

常用工况:主要目的为模拟减压阀最常用的运行工况,优先保证此工况的运行噪声。

小压差工况:主要目的为模拟当进出口压差最小,检验减压阀流通能力和运行噪声值。

高压差工况:主要目的为模拟当进出口压差最大,减压阀运行最高噪声值。

5 原结构减压阀 CFD 数值模拟

主变机组技术供水 ZJY46H 型 DN200 组合式减压阀原型结构为单阀一级减压消能,通过改变节流锥开度来调节压力和流量,以节流效应达到减压目的^[4,5]。当进口压力或流量发生变化时,减压阀靠介质本身的能量进行自动调节,从而保持出口压力为原设定好的低压值,减压阀结构如图 2 所示。

5.1 常用工况

ZJY46H 型 DN200 组合式减压阀进口压力设定为 1.16 MPa,通过节流锥一级减压消能到整定压力 0.55 MPa,流量设定为 220 m³/h。通过 CFD 数值模拟计算结果主阀开度为 6.5 mm,节流口最高湍流动

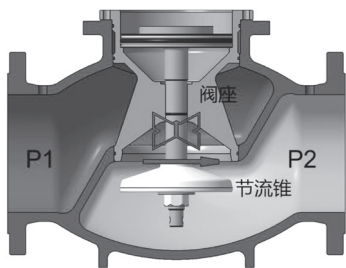


图 2 ZJY46H 型组合式减压阀结构示意图

能为 32.6 kg/J, 节流口最高流速为 44.15 m/s, 模拟噪声为 85.2 dB。计算结果如图 3~ 图 6 所示。

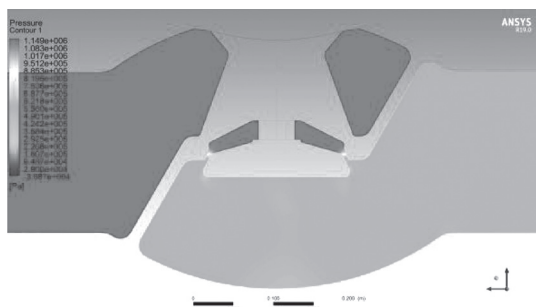


图 3 压力分布计算结果

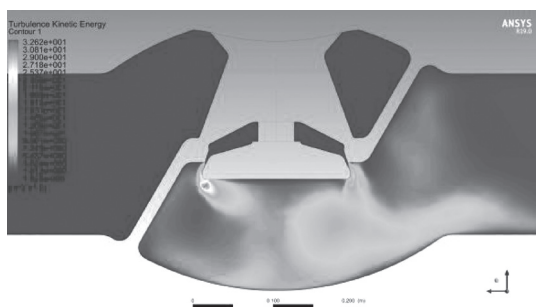


图 4 湍流动能分布计算结果

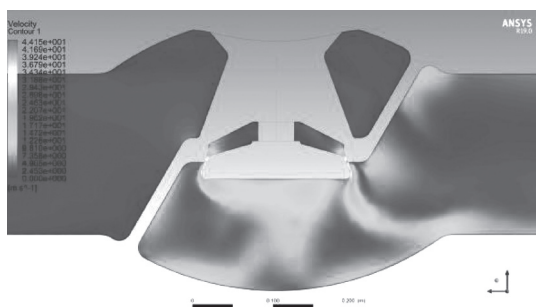


图 5 流速分布计算结果

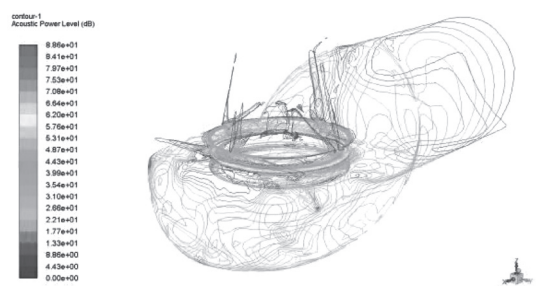


图 6 噪声分布计算结果

5.2 高压差工况

ZJY46H 型 DN200 组合式减压阀进口压力设定为 1.28 MPa, 通过节流锥一级减压消能到整定压力 0.55 MPa, 流量设定为 220 m³/h。通过 CFD 数值模拟计算结果主阀开度为 5.5 mm, 节流口最高湍流动能为 37.4 kg/J, 节流口最高流速为 45.7 m/s, 模拟噪声为 90.2 dB。计算结果如图 7~ 图 10 所示。

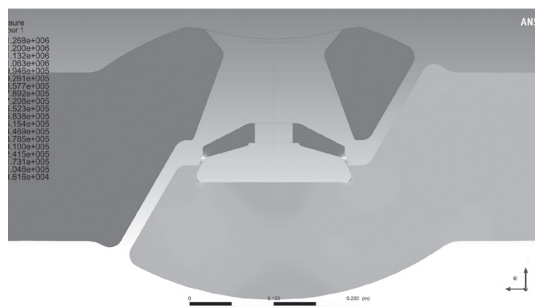


图 7 压力分布计算结果

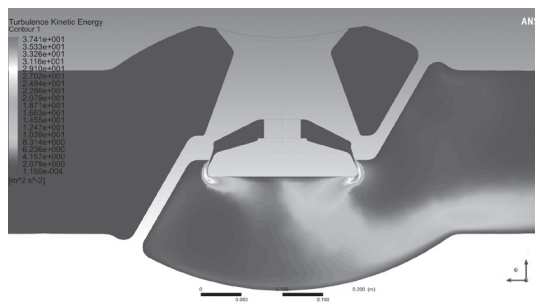


图 8 湍流动能分布计算结果

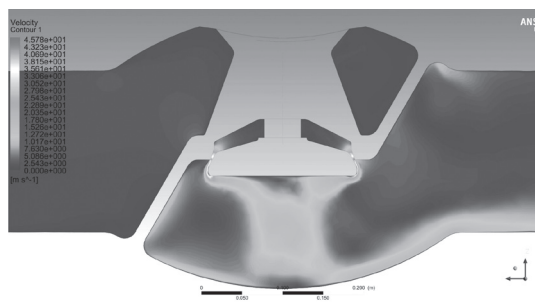


图 9 流速分布计算结果

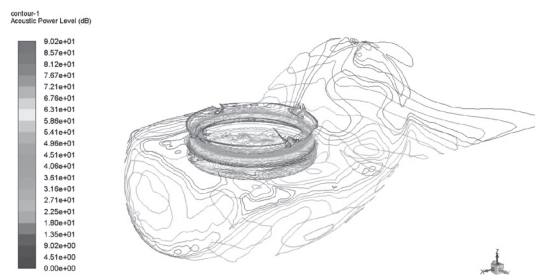


图 10 噪声分布计算结果

5.3 小压差工况

ZJY46H 型 DN200 组合式减压阀进口压力设

定为 1.05 MPa,通过节流锥一级减压消能到整定压力 0.55 MPa,流量设定为 220 m³/h。通过 CFD 模拟计算结果主阀开度为 8 mm,节流口最高湍流动能为 25.1 kg/J,节流口最高流速为 37.2 m/s,模拟噪声为 83.5 dB。计算结果如图 11~ 图 14 所示。

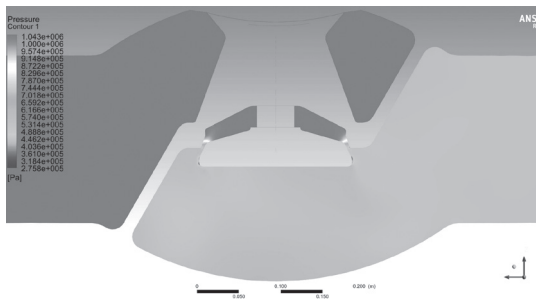


图 11 压力分布计算结果

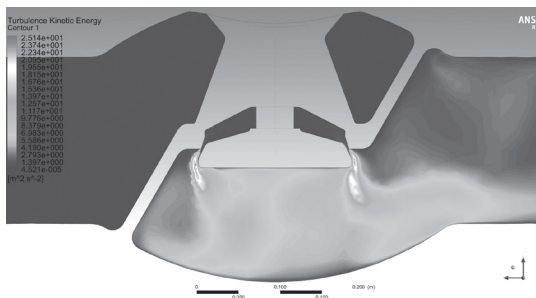


图 12 湍流动能分布计算结果

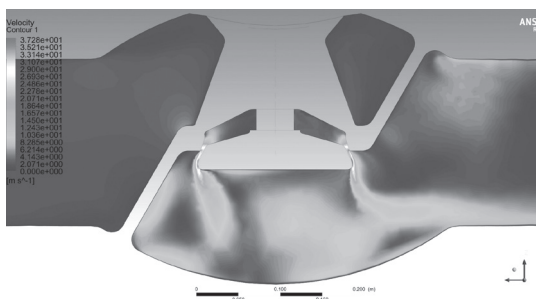


图 13 流速分布计算结果

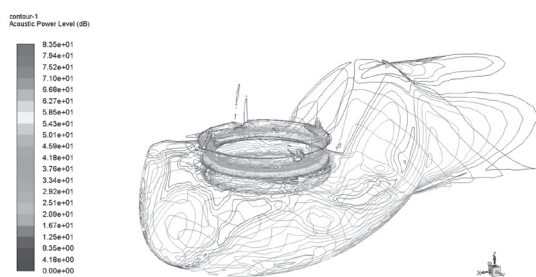


图 14 噪声分布计算结果

5.4 CFD 数值模拟总结

原结构 ZJY46H 型 DN200 组合式减压阀,主阀行程为 34 mm。当减压阀常用工况运行时,CFD 数值模拟结果主阀开度为 6.5 mm 为总行程的 19.1%,最高湍流动能为 32.6 kg/J,最高流速为 44.15 m/s,

最高模拟噪声为 85.2 dB;现场运行噪声为 87.0 dB,模拟噪声与实际相差 1.8 dB,说明 CFD 数值模拟方法正确性。当减压阀为高压差工况时,主阀开度从常用工况的 6.5 mm 下降到 5.5 mm;最高湍流动能从 32.6 kg/J 上升到 37.4 kg/J,增加 4.8 kg/J;最高流速从 44.15 m/s 增加到 45.7 m/s,增加 1.55 m/s;最高模拟噪声从 85.2 dB 增加到 90.2 dB,增加 5 dB。当减压阀为小压差工况时,主阀开度从常用工况的 6.5 mm 上升到 8.0 mm;最高湍流动能从 32.6 kg/J 下降到 25.1 kg/J,下降 7.5 kg/J;最高流速从 44.15 m/s 下降至 37.2 m/s,下降 6.95 m/s;最高模拟噪声从 85.2 dB 下降到 83.5 dB,下降 1.7 dB。

通过 CFD 数值模拟结果,当减压阀进口与出口压差增加时减压阀主阀开度减小,湍流动能增加,最高速增加,运行噪声也随之增加;同理反之减压阀运行噪声减小。CFD 数值模拟如表 3 所示。

表 3 原结构减压阀 CFD 数值模拟表

进口压力 /MPa	出口压力 /MPa	主阀开度 /mm	流量 /m ³ /h	最高湍流 动能 /kg/J	最高流速 /m/s	最高模 拟噪声 /dB
1.28	0.55	5.5	220	37.4	45.7	90.2
1.16	0.55	6.5	220	32.6	44.15	85.2
1.05	0.55	8.0	220	25.1	37.2	83.5

6 低噪声防汽蚀减压阀 CFD 数值模拟

机组主变技术供水 ZJY46H-25P DN200 组合式减压阀优化升级后为低噪声防汽蚀减压阀,将原型结构的主阀阀座 4 个导流板取消,将原型结构的阀座总成更换成带降噪机构的阀座总成;降噪型阀座总成新增降噪套筒和降噪型节流锥。通过降噪套筒减小压差,增加主阀开度,降低节流口的湍流动能和流速,实现降噪,如图 15 所示。

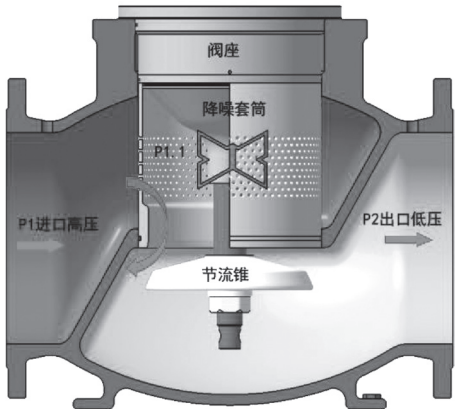


图 15 ZJY46H-D 型低噪声防汽蚀减压阀结构示意图

6.1 常用工况

ZJY46H-D 型 DN200 低噪声防汽蚀减压阀通过降噪套筒与节流锥,实现单阀二级减压消能,进口压力设定为 1.16 MPa,通过降噪套筒将 1.16 MPa 减压消能到 0.91 MPa,最后通过节流锥从 0.91 MPa 减压消能到整定压力 0.55 MPa,流量设定为 $220 \text{ m}^3/\text{h}$ 。通过 CFD 模拟计算结果主阀开度为 8.5 mm,节流口最高湍流动能为 30.7 kg/J ,节流口最高流速为 32.9 m/s ,模拟噪声为 78.2 dB 。计算结果如图 16~ 图 19 所示。

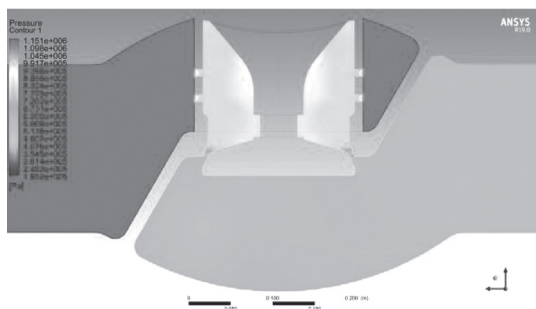


图 16 压力分布计算结果

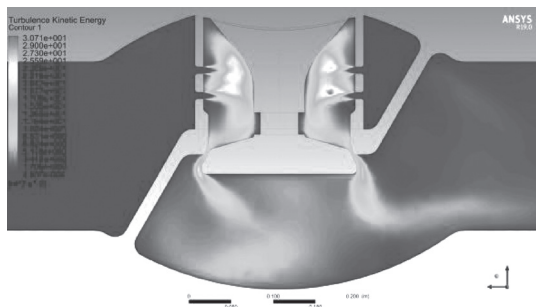


图 17 湍流动能分布计算结果

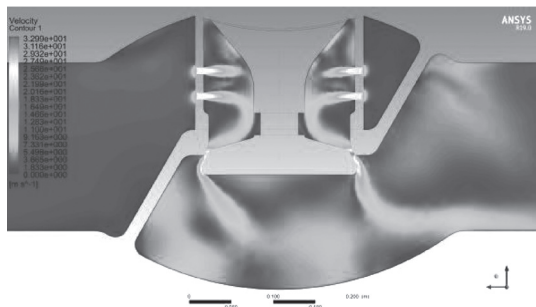


图 18 流速分布计算结果

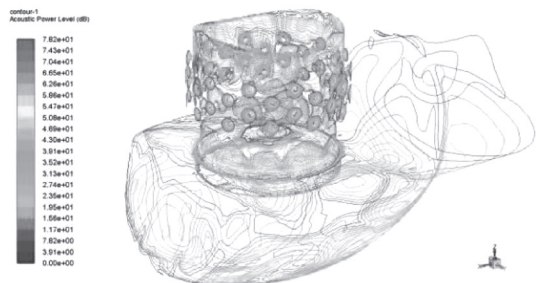


图 19 噪声分布计算结果

6.2 高压差工况

ZJY46H-D 型 DN200 低噪声防汽蚀减压阀通过降噪套筒与节流锥,实现单阀二级减压消能,进口压力设定为 1.28 MPa,通过降噪套筒将 1.28 MPa 减压消能到 1.03 MPa,最后通过节流锥从 1.03 MPa 减压消能到整定压力 0.55 MPa,流量设定为 $220 \text{ m}^3/\text{h}$ 。通过 CFD 模拟计算结果主阀开度为 7 mm,节流口最高湍流动能为 34.8 kg/J ,节流口最高流速为 41.0 m/s ,模拟噪声为 79.5 dB 。计算结果如图 20~ 图 23 所示。

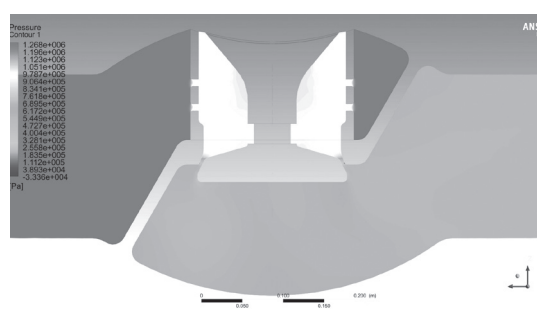


图 20 压力分布计算结果

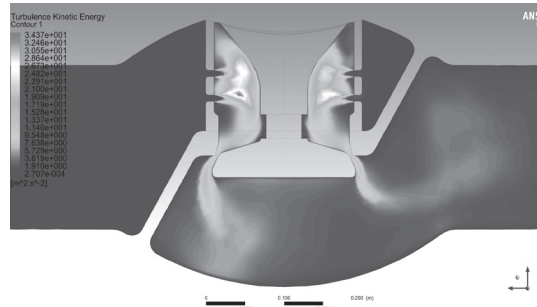


图 21 湍流动能分布计算结果

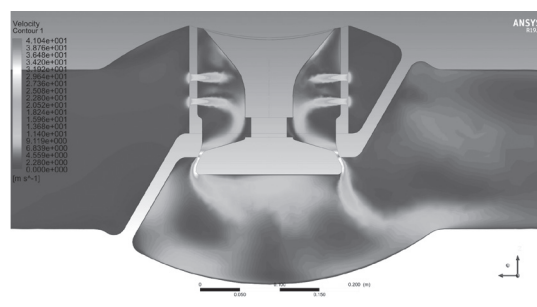


图 22 流速分布计算结果

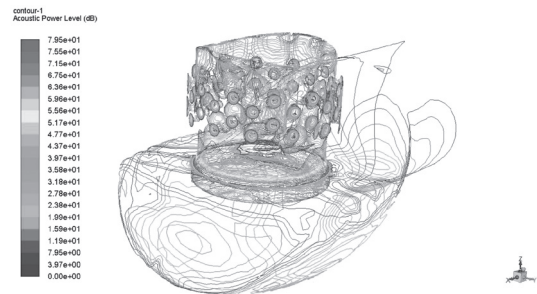


图 23 噪声分布计算结果

6.3 小压差工况

ZJY46H-D 型 DN200 低噪声防汽蚀减压阀通过降噪套筒与节流锥,实现单阀二级减压消能,进口压力设定为 1.05 MPa,通过降噪套筒将 1.05 MPa 减压消能到 0.8 MPa,最后通过节流锥从 0.8 MPa 减压消能到整定压力 0.55 MPa,流量设定为 220 m³/h。通过 CFD 模拟计算结果主阀开度为 12 mm,节流口最高湍流动能为 28.8 kg/J,节流口最高流速为 29.3 m/s,模拟噪声为 78.2 dB。计算结果如图 24~图 27 所示。

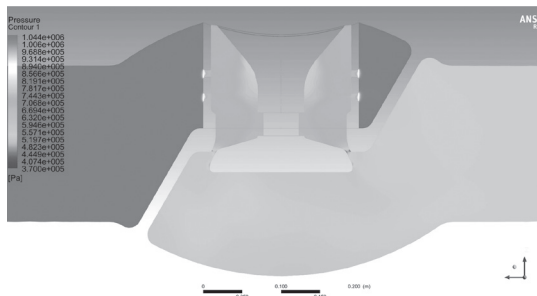


图 24 压力分布计算结果

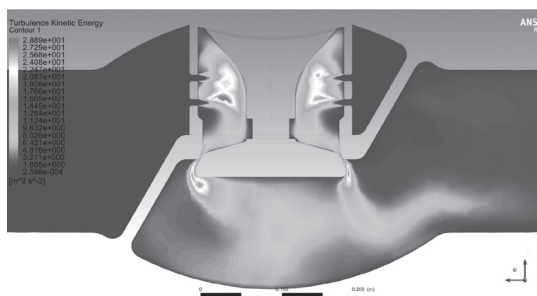


图 25 湍流动能分布计算结果

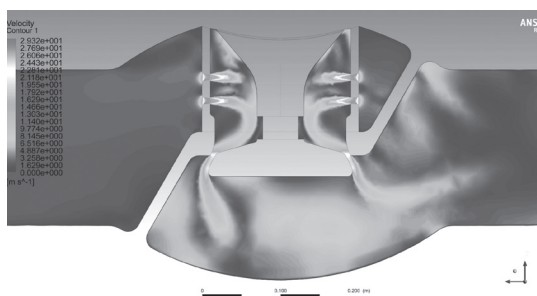


图 26 流速分布计算结果

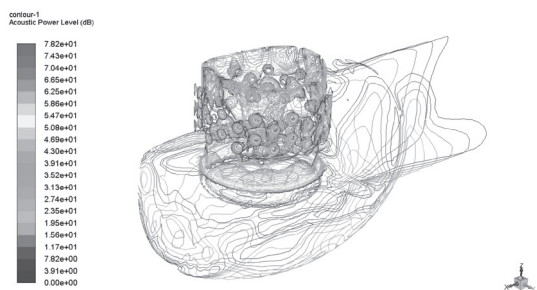


图 27 噪声分布计算结果

6.4 CFD 数模模拟总结

机组主变技术供水 ZJY46H-25P DN200 组合式减压阀优化升级后为低噪声防汽蚀减压阀;设计降噪方案为单阀二级减压消能,配置带降噪机构的阀座总成;降噪型阀座总成新增降噪套筒和降噪型节流锥。通过降噪套筒减小压差,增加主阀开度,降低节流口的湍流动能和流速,实现降噪。

优化后 ZJY46H-D 型 DN200 低噪声减压阀,主阀行程为 34 mm。当减压阀常用工况时,CFD 数值模拟结果主阀开度为 8.5 mm 为总行程的 25%。主阀开度从 6.5 mm 增加到 8.5 mm,主阀开度增加 2 mm,增加 30.8%;从原结构最高湍流动能 32.6 kg/J 下降到 30.7 kg/J,下降 5.8%;从原结构最高流速为 44.15 m/s 下降到 32.9 m/s,下降 25.5%;从原结构最高模拟噪声为 85.2 dB 下降到 78.2 dB,下降 8.2%。

当减压阀为高压差工况时,从原结构主阀开度 5.5 mm 增加到 7 mm,主阀开度增加 2.5 mm,增加 45.5%;从原结构最高湍流动能 37.4 kg/J 下降到 34.8 kg/J,下降 6.95%;从原结构最高流速为 45.7 m/s 下降到 41.0 m/s,下降 10.3%;从原结构最高模拟噪声为 90.2 dB 下降到 79.5 dB,下降 11.9%。当减压阀为小压差工况时,从原结构主阀开度 8.0 mm 增加到 12 mm,主阀开度增加 4 mm,增加 50.0%;从原结构最高湍流动能 25.1 kg/J 上升到 28.8 kg/J,上升 14.7%;从原结构最高流速为 37.2 m/s 下降到 29.3 m/s,下降 21.2%;从原结构最高模拟噪声为 83.5 dB 下降到 78.2 dB,下降 6.3%。CFD 数值模拟如表 4 所示。

表 4 低噪声防汽蚀减压阀 CFD 数值模拟表

进口压力 /MPa	出口压力 /MPa	主阀开度 /mm	流量 /m ³ /h	最高湍 流动能 /kg/J	最高流速 /m/s	最高模 拟噪声 /dB
1.28	0.55	7.0	220	34.8	41.0	79.5
1.16	0.55	8.5	220	30.7	32.9	78.2
1.05	0.55	12.0	220	28.8	29.3	78.2

7 减压阀在水电站应用调试

梨园水电站 1 号 /2 号 /3 号 /4 号机组主变技术供水 DN200 组合式减压阀一路,共计 4 台;通过优化升级为低噪声防汽蚀减压阀后,经水电站现场调试,常用运行工况为进口压力 1.16 MPa,出口压力为 0.55 MPa,流量为 230 m³/h,距离减压阀 1 m 处,噪声

(下转第 147 页)

去原动力,同步发电机变为电动机状态运行,从电网吸收能量驱动水轮机运转。发电机功率逐渐减少至零然后反向。当发电机正向有功功率保护监视到发电机功率低于某个设定的正向功率门槛值,该保护动作于报警或停机。

保护装置采用正向逆功率保护,由于 4 号发电机机端 CT 为负极性。在保护装置定值单上无直接取反项选择,虽然在保护装置计算时可以做取反处理,但在定值单上并不体现,在后续机组改造过程中很容易疏忽此设置。因此,现场采用统一调整 4 号发电机 CT 二次侧接线及相关保护装置设置,为满足不影响尚未改造的 3 号机组继续运行的要求,将 4 号发电机机端 CT 调整为正极性接线,4 号发电机中性点侧 CT 为正极性接线,4 号发电机差动保护装置设置为负极性(矢量差)。主变差动保护装置设置对 4 号发电机调整为正极性(矢量和)。需要注意的是,3 号机组改造后将与已改造的 4 号机组 CT 极性 & 接线一致,应将主变差动保护装置对 3 号发电机极性设置调整为正极性(矢量和)。调整后发电机逆功率保护动作问题得以解决。

5 结语

该电站发电机相关保护动作并非真实发生了

(上接第 122 页)

为 79.6~81.4 dB。减压阀运行噪声从 87 dB 下降到 79.6~81.4 dB,下降了 6.4%,满足技术要求的 ≤ 82 dB。

8 结论

针对 4 台机组主变技术供水 ZJY46H-25P DN200 组合式减压阀,梨园水电站与湘潭中基公司共同合作采用先进的 CFD 数值模拟仿真技术优化减压阀运行噪声。原机组主变技术供水 ZJY46H-25P DN200 组合式减压阀将主阀阀座 4 个导流板取消,更换成带降噪机构的阀座总成;降噪型阀座总成新增加降噪套筒和降噪型节流锥。通过降噪套筒减小压差,增加主阀开度,降低节流口的湍流动能和流速,实现降噪。

(1) 优化后的 ZJY46H-D 型 DN200 低噪声防气蚀减压阀,常用工况 CFD 数值模拟仿真噪声结果为 78.2 dB,实际电站现场调式结果为 79.6~81.4 dB,满

相关设备故障引起的,属于保护误动作。从整体来看,引发继电保护误动的因素众多,与设备和技术有很大关系,例如,继电器和继电保护装置故障、图纸设计错误、现场保护设施不完备、保护措施执行不到位、检修和保护操作不当等,引起继电保护及安全自动装置的不正确动作,造成事故跳闸^[5],要实现调试中继电保护的有效防误动,应重视前期设计规划的合理性,现场接线的正确性,以及调试过程的规范性。

通过对国外某改造水电站发电机继电保护调试过程中出现的保护动作及报警问题的分析,提供了解决此类问题的分析思路,对今后类似保护装置调试和方案设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 姚雄,刘伟浩.220 kV 智能变电站继电保护及自动化分析[J].电子技术与软件工程,2021(9):215-216.
- [2] 张丽敏,徐宝祥,衣得武,等.某电站改造工程基本设计报告[R].
- [3] 南瑞继保.PCS-985GE 发电机保护装置说明书[Z].
- [4] 熊友红,鄢守鑫.一起 110 kV 变电所主变差动保护误动作事故分析[J].冶金动力,2015(7):1-3.
- [5] 杨庆新.220 kV 变电站继电保护的“三误”事故原因及技术措施[J].电力自动化,2023(12):52-54.

足技术要求;CFD 数值模拟与实际运行噪声,最小偏差为 1.4 dB,最大偏差为 3.2 dB。

(2) 针对小压差小流量的减压阀降噪套筒精准消能减压,CFD 数值模拟网格划分采用 Proximity and Curvature,强化降噪套筒网格精度与曲率有实际应用效果。

参考文献:

- [1] 龙师成,康强.ZJY46H 型 DN450 组合式减压阀流量与噪声研究[J].水电站机电技术,2025,48(3):128-134.
- [2] 周刚,张殿祥.ZJY46H 型减压阀在高水头电站技术供水应用的经验[J].水电站机电技术,2010,33(2):68-71.
- [3] 万双民,周刚,王天文,等.论高水头水电站低噪声减压技术的研究与应用[J].水电站机电技术,2021,44(1):5-9.
- [4] 朱修传,朱劲松.矿井泥浆泵泵阀流场的数值分析[J].煤矿机械,2017,38(4):49-52.
- [5] 王蓉仁.直动式减压阀流致噪声特性与抑制方法研究[D].秦皇岛:燕山大学,2024.