

文章编号：0258-0926(2017)01-0104-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.01.0104

核电厂汽轮机甩负荷中调阀阀位反馈与指令偏差超限原因分析

高建强¹, 边岩¹, 方立军¹, 饶宛²

1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北保定, 071003;
2. 中广核工程有限公司, 广东深圳, 518124

摘要: 某 1000 MW 核电机组在快速甩负荷 (FCB) 试验时, 中压调节阀 (简称中调阀) 不能及时关闭, 发生中压调节阀阀位反馈值与指令值偏差超限问题, 引发跳机保护动作。分析发现, 造成这次问题的原因是调节阀弹簧力矩与阀门气动力矩不匹配。利用 FLUENT 软件对该汽轮机中调阀内的三维流场进行数值模拟, 得到阀门气动力矩和阀门开度的变化关系。结果表明: 气动力矩随调节阀开度的增加先增大后减小, 开度为 30°左右时达到最大值; 此时, 若弹簧力矩与阀门气动力矩不匹配就会发生中调阀关闭动作迟缓甚至卡涩问题, 造成阀位反馈值与指令值偏差超限。

关键词: 核电; 中调阀; 偏差; 数值模拟; 气动力矩

中图分类号: TK263.7 **文献标志码:** A

Analysis of Deviation of Medium Pressure Control Valve Position Feedback and Instruction Run Over the Limit in Nuclear Power Plant Turbine Fast Cut Back

Gao Jianqiang¹, Bian Yan¹, Fang Lijun¹, Rao Wan²

1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei, 071003, China;
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract: In the 1000 MW nuclear power units FCB (fast cut back) test, the medium pressure control valve can not be closed in time, the deviation of the valve position feedback and instruction run over the limit occurred, which caused the turbine trip protection action. Through the analysis, it was found that the mismatch of the aerodynamic moment and the spring moment was the cause of the problem. The three-dimensional flow field was numerically simulated by FLUENT, and the change regulation of aerodynamic moment was obtained. The conclusion shows that the aerodynamic moment first increased and then decreased with the increasing of opening degrees and the maximum value was reached when the opening degree was around 30°. At this point, if the aerodynamic moment did not match the spring moment, the medium pressure valve would close slowly and even clamped, leading to the deviation of the valve position feedback and instruction run over the limit.

Key words: Nuclear power, Medium pressure control valve, Deviation, Numerically simulation, Aerodynamic moment

0 引言

1000 MW 核电机组汽轮机的中压缸进汽管道内蒸汽流量大, 管道和阀门直径大, 中压调节

阀 (简称中调阀) 关闭时, 阀瓣及阀杆将承受很大的力和力矩^[1-4]。当机组快速甩负荷 (FCB) 时, 阀关闭指令发出后, 如果中调阀不能快速关闭,

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-12-20

作者简介: 高建强 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事火电厂系统建模与仿真的研究

在管道内蓄积的大量蒸汽就会进入汽轮机中低压缸,使得汽轮机超速,严重时发生飞车事故^[5-6]。

某 1000 MW 核电机组在调试过程中,进行满负荷工况下的 FCB 试验时,出现了中调阀控制指令和阀门位置反馈偏差超限,造成跳机保护、FCB 试验失败。初步分析排除了机械、信号传输故障等原因。为进一步分析其原因,利用 FLUENT 软件对该核电汽轮机中调阀内的三维流场进行了数值模拟,发现执行机构弹簧力矩与中调阀气动力矩不匹配、弹簧提供的弹力不足,是造成此次 FCB 失败的主要原因。

1 FCB 试验过程

某 1000 MW 核电机组在满负荷工况下进行 FCB 试验,通过断开超高压断路器,使发电机由 100% 负荷甩至 5% 负荷,带厂用电运行。主控操作员断开主开关,试验开始,试验过程记录如下:

(1) 2 s 时,超加速信号触发,高压、中压调节阀正常快速关闭,转速先升后降。

(2) 14 s 时,随着转速下降至 1494 r/min,高压、中压调节阀开启,高压调节阀开启至约 8°,中调阀开启至约 28°。

(3) 15 s 时,转速升至 1510 r/min,此时,中调阀下达关闭指令,但现场数据显示,中调阀位指令值与阀位反馈值之间的偏差已超过 10%。

(4) 25 s 时,中调阀位指令值与阀位反馈值之间的偏差已超过 10% 且持续时间达到 10 s,汽轮机跳闸停机。

试验过程中,导致跳机的根本原因是由于转速高于额定转速,系统发出关阀指令后,高压阀门正确响应关闭,但中调阀没有关闭。趋势记录显示 4 个中调阀动作趋势一致,在系统中几乎同时触发了阀位反馈值与指令值偏差大于 10% 报警,偏差大于 10 s 导致保护跳机。

2 原因分析

2.1 执行机构工作原理

FCB 试验中驱动阀门启闭的装置为液压驱动装置。当调节阀慢开进行调节时,油动机中的液压油进入油缸底部并推动活塞带动蝶阀慢开,同时,将弹簧装置压缩蓄能;一旦机组甩负荷,阀关闭指令发出后,便通过远程控制系统将关闭信号传递给液压驱动装置;此时,驱动装置自动接

通快关回路,控制弹簧迅速弹开,驱动相应的曲柄连杆机构实现调节阀的快关操作^[7]。曲柄连杆机构由弹簧、油动机运动部件、连杆、曲柄组成(图 1)。

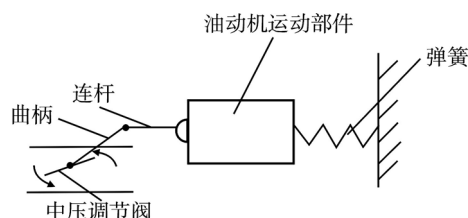


图 1 曲柄连杆机构原理图

Fig.1 Crank and Connecting Rod Mechanism

2.2 原因分析

造成中调阀位指令值和阀位反馈值偏差超限的可能原因主要有:执行机构故障、阀瓣变形、信号传输故障和气动力矩变化等。

(1) 执行机构故障

阀门关闭的过程需要相应的执行机构实现,从弹簧弹开到阀门关闭,各个部件都要完成各自的行程才能保证阀门迅速关闭,但各个部件的连接部位都存在摩擦力,阻碍执行过程。例如:曲柄与连杆连接销的摩擦力、曲柄端阀轴承摩擦力、非曲柄端阀轴承摩擦力。部件之间存在相对运动,执行机构的设计安装不当或者使用时间较长而产生的磨损都会增大部件之间的摩擦力,增加运动阻力。尤其是处于管道内部的部件所处的环境非常恶劣,不仅会受到水分的腐蚀,还会因为高温而受热膨胀,增大机械摩擦的概率。机械摩擦过大就会使得执行机构无法正常工作,造成中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限。

弹簧故障也是造成中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限的原因之一。弹簧是执行机构中的蓄能器,如果它工作异常也会造成阀门无法正常关闭。可能引起弹簧故障的原因主要有:长时间使用造成弹簧自身的疲劳损坏,弹性系数降低;由于外部原因或者自身的破损使得弹簧卡住,无法正常弹开,造成中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限;弹簧部件本身设计不合理,造成中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限。

(2) 阀瓣变形

中调阀阀瓣与阀体之间的间隙很小,大约只有 1 mm,而且核电汽轮机中压进汽管道内是高温

环境,所以阀瓣长时间处于这种环境下会受热膨胀。而且中压管道内都为湿蒸汽,水分较多,蒸汽的流速也较大,液滴会对阀瓣造成冲击,久而久之,阀瓣很有可能发生变形。调节阀关闭的过程中,这2种原因造成的阀瓣变形都很有可能使阀瓣与管道发生碰撞,使得阀门卡涩,造成中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限。

(3) 信号传输故障

信号传输过程中如果发生故障会造成中调阀阀位反馈与指令偏差超限。

(4) 气动力矩变化

中调阀阀杆的扭矩主要由摩擦力矩和气动力矩决定。摩擦力矩的大小基本不随阀门工作状态的变化而改变,而气动力矩的大小和方向主要取决于阀瓣周围的压力分布状况,阀门开度、蒸汽流速等都会对其产生影响。在中调阀关闭过程中,如果某一时刻气动力矩值已经超出预期,使得阀杆受到的合力矩过大,就会造成关闭阀门的弹簧力矩不足以抵消上述合力矩的作用,致使中调阀门在关闭过程中卡涩或者关闭时间过长,从而发生中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限问题。

此次FCB试验失败后,现场检查液压油回路,油泵、滤网、蓄能器、电缆等设备未发现故障,可排除执行机构故障和信号传输故障的可能性。由于不仅仅是单个中调阀故障,而是4台中调阀同时发生共模故障,可排除执行机构和阀瓣变形故障。所以,此次FCB试验中,造成中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限的原因很有可能是气动力矩随阀门开度不断变化,某一时刻阀杆受到的阻力矩过大,弹簧提供的弹力不足引起的。

由于计算阀门气动力矩的复杂性,理论计算和实验手段都很难准确地得到气动力矩和阀门开度的变化关系。近年来,计算流体力学(CFD)方法成为研究阀门气动力矩的重要手段,并取得了很好的效果^[8-9]。因此,采用FLUENT软件对中调阀内三维流场进行数值模拟,可得到气动力矩和阀门开度的变化关系。

3 数值模拟结果及分析

汽轮机中压缸进汽管道上安装有型号为DN1200的大口径蝶阀组。上游蝶阀为截止阀,下游蝶阀为调节阀,选取阀门前后一段距离作为计算流域,并对其进行网格划分,远离阀门的部

分采用六面体结构化网格,阀门附近采用四面体非结构化网格。

满负荷工况下,采用的介质为单相过热蒸汽,进出口分别设置为速度进口与压力出口,固壁面采用无滑移边界条件。选用的基本物理模型为标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,并采用压力求解器及半隐式算法进行求解,离散格式全部采用二阶迎风格式。

利用Report工具中的moment选项,可以得到计算工况下作用于阀杆的气动力矩数值。选定调节阀的阀杆为求解扭矩的轴线,再选中中调阀前后两个表面,即可得到不同调节阀开度下对应的气动力矩值。当阀门开度为 90° 时,阀板上下的压力场完全对称,此时,作用于阀杆的气动力矩为零。如图2所示,为调节阀开度在 $10^\circ\sim 80^\circ$ 范围内气动力矩变化曲线,纵坐标 $T(\theta)$ 为气动力矩,横坐标 θ 为调节阀开度。

从图2中可以看出, θ 在 $10^\circ\sim 30^\circ$ 之间时, $T(\theta)$ 随 θ 的增加而增加, 30° 之后, $T(\theta)$ 又随着 θ 的增大而减小,在 θ 为 30° 时,达到最大值。

当调节阀在关闭过程中, $T(\theta)$ 随 θ 的减小而增加, 30° 时达到最大值,此时,阀杆受到的阻力矩最大;如果弹簧提供的弹力不足,就会使阀门不能正常回座,这就合理解释了该核电机组FCB试验中中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限现象。所以,调节阀在关闭过程中出现的阀位反馈值与指令值偏差超限问题是由于阀门关闭到某一时刻时, $T(\theta)$ 过大而弹簧力矩不足引起的。

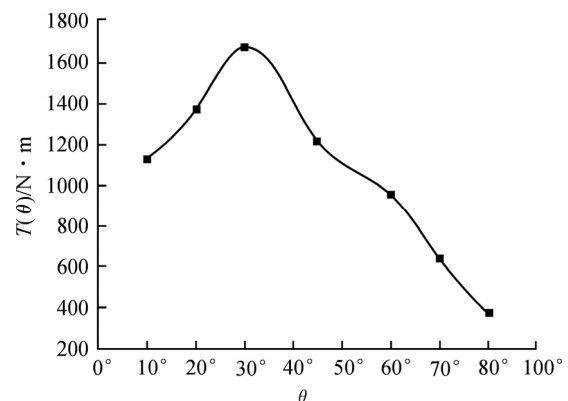


图2 气动力矩特性曲线

Fig. 2 Aerodynamic Torque Characteristic Curve

4 结论

造成大型核电机组汽轮机中调阀阀位反馈值

与指令值偏差超限的原因主要与执行机构故障、阀瓣变形、信号传输故障和气动力矩变化等因素有关。

通过模拟计算作用于阀杆气动力矩的变化特性，发现弹簧力矩与气动力矩不匹配、弹簧提供的弹力不足是引起某 1000 MW 核电机组 FCB 试验中调阀阀位反馈值与指令值偏差超限的原因。因此，在设计、选购阀门执行机构时，应该考虑阀门气动力矩随工况、阀门开度等的变化情况，确保阀门的开关控制可靠，保障机组安全运行。

参考文献：

- [1] 杨晓辉，单世超. 核电汽轮机与火电汽轮机比较分析[J]. 汽轮机技术，2006, 48(06): 404-406.
- [2] 王世勇，玉兵，徐宗富. 核电厂汽轮机热力性能试验计算与分析[J]. 核动力工程，2011, 32(2): 18-22.
- [3] 宁继宏. 百万千瓦级核电机组汽轮机的特点及选型原则[J]. 电力建设，2009, 30(11): 63-67.
- [4] 陈娟，徐大懋. 核电汽轮机的特点及选型[J]. 热能动力工程，2010, 04: 459-462.
- [5] 覃超，谢诞梅，董川. 等. 超临界汽轮机超速保护系统分析[J]. 电站系统工程，2007, 01: 57-59.
- [6] Novoselov V B, Shekhter M V. The modern overspeed protection system for steam turbines of the ZAO Ural Turbine Works[J]. Engineering Village, 2011, 58(1): 21-25.
- [7] 李明. 液压驱动装置在阀门上的应用[J]. 阀门，2014, 03: 17-19.
- [8] 沈洋，金晓宏，杨科，等. 蝶阀三维流场仿真和阀板驱动力矩求解[J]. 中国科技论文，2013, 8(8): 20-23.
- [9] 饶宛，边岩，张旭瑞，等. AP1 000 核电汽轮机中调阀气动力矩数值模拟[J]. 汽轮机技术，2015, 57(5): 347-349.

(责任编辑：杨洁蕾)