

Research on control of steam turbine regulating valve in nuclear power plant

Dafei Wu

China National Nuclear Zhanjiang Nuclear Power Co., Ltd. Zhanjiang, Guangdong, 524000, China

Abstract

This article conducts an in-depth analysis of the control loop of the steam turbine governor valves at Dongqi, proposing component-level optimization suggestions to enhance equipment operational reliability. The control core of the CAP1000 unit consists of speed control and load control, with the final control object being the high and medium pressure inlet governor valves. The key component of these valves, the electro-hydraulic proportional valve, adjusts the valve opening by controlling the volume of pressurized oil in the hydraulic actuator. The proportional valve employs a pilot-operated structure and incorporates an LVDT sensor to provide feedback on the valve spool position. The LVDT is a three-wire non-contact displacement sensor that reflects valve position through current signals. The article examines a 2021 outage incident at a peer power plant caused by LVDT signal line insulation damage and proposes multiple improvement measures, including redundant design (such as redundant power supply for VICKERS cards), fault tolerance (such as LVDT signal hold function), and maintenance reinforcement (such as regular checks on wiring and cable insulation). Post-optimization, it is expected to reduce unplanned downtime incidents caused by LVDT failures.

Keywords

Dongqi steam turbine; regulating valve; proportional valve; LVDT;

核电厂汽轮机调节阀控制回路优化研究

武大飞

国核湛江核电有限公司, 中国·广东 湛江 524000

摘要

本文针对东汽汽轮机调节阀的控制回路进行深入分析, 提出部件级优化建议以提升设备运行可靠性。CAP1000机组的控制核心为转速控制和负荷控制, 最终控制对象是高中压进汽调节阀。调节阀的主要部件电液比例阀通过控制油动机中的压力油量来调整阀门开度, 比例阀采用先导式结构, 内置LVDT传感器提供阀芯位置反馈。LVDT传感器为三线制非接触式位移传感器, 通过电流信号反映阀门位置。文章分析了2021年某同行电厂因LVDT信号线绝缘破损导致的停机事故, 并提出多项改进措施, 包括冗余设计(如VICKERS卡的冗余供电)、故障容错(如LVDT信号保持功能)和运维强化(如定期检查接线和电缆绝缘)。优化后预期可减少因LVDT故障导致的非计划停机事件。

关键词

东汽汽轮机; 调节阀; 比例阀; LVDT

1 引言

CAP1000 汽轮机组使用东汽汽轮机有限公司制造的主汽轮机和控制系统, 因部分控制回路的重要部件在汽轮机运行时更容易因振动、接线异常导致故障, 本文重点结合上游设计和运维经验对汽轮机调节阀控制回路进行深入研究和分析。

2 汽机控制回路工作原理

核电厂主汽轮机的控制核心为转速控制和负荷控制, 转速控制和负荷控制最终的控制对象均为高中压进汽调

节阀。

控制系统转速控制在汽轮机挂闸后, 通过画面操作设定目标转速, 目标转速经过由机组热状态计算的升速率限制计算为给定转速计算值。在汽轮机控制系统自动控制模式下, 给定转速计算值赋值给给定转速参考值, 给定转速参考值与汽轮机实际转速值的偏差调节转速。转速控制回路通过PI调节实现汽轮机实际转速的控制, 当有转速偏差时, 偏差值会与转速不等率进行比较计算成转速需求流量, 通过将转速需求流量叠加到进汽阀门流量控制需求来控制进汽阀门的开大或关小。进汽阀门关小则会导致汽轮机转速下降, 进汽阀门开大则会导致汽轮机转速上升。^[1]

汽轮机转速控制为自动闭环控制模式, 该模式除具备基本转速控制回路的所有功能外, 它的转速给定值可以根据

【作者简介】武大飞(1988-), 男, 中国安徽蚌埠人, 工程师, 本科, 从事电厂自动控制研究。

实际工况自动设定,由于回路中增加了比例积分环节,所以在该控制方式下,转速给定值在升、降过程中都有保持功能和速率控制功能。在阿尔斯通设计的控制逻辑里,存在一个重要中间变量:蒸汽需求量。按照东汽汽轮机基本控制模型,汽轮机维持 1500rpm 所需的理论蒸汽需求量为 4%,负荷回路设定值理论上应与经过闭环 PID 控制后计算出来的负荷回路蒸汽需求量相同。理论上这两部分叠加在一起总共 104%,能发 1250MW 电功率。这需要转速回路、负荷回路的 PID 参数以及阀门特性曲线、实际阀门参数等重要参数配合默契。

3 汽轮机调节阀工作原理

3.1 电液比例阀

汽轮机调节阀的主要控制部件为电液比例阀,其通过控制进入汽轮机高中压调节阀油动机中的压力油量来控制高中压调节阀开度,主要由先导阀、减压阀和主阀构成。先导阀装有单向比例电磁铁,用于接收 vickers 卡送来的比例阀电磁衔铁指令,先导阀及主阀装有 LVDT 传感器,用于将先导级反馈和主级反馈信号送至 vickers 卡。^[2]

比例电磁铁主要由线圈、套管、极靴、非磁性垫圈和衔铁等结构组成。套管位于线圈和衔铁之间,由两段磁性材料和一段非磁性材料焊接而成,以便使磁场集中于极靴与衔铁之间的间隙;极靴插装于套管前端并在处于通电位置时为衔铁提供止挡;非磁性垫圈用于防止衔铁和极靴完全闭合,限制比例电磁铁所产生的最大力并在断电时防止衔铁吸持于极靴。衔铁和极靴上均有通孔,使油液在工作时得以通过,平衡先导阀芯左右两侧压力。衔铁左侧的弱弹簧把衔铁/推杆组件推至与阀芯接触的状态,且当阀门垂直安装时也能够消除所有间隙。这种结构决定了比例电磁铁稳态特性曲线的形状。

当对比例电磁铁线圈通以一定电流时,因套管中存在隔磁环结构,线圈周围形成两条主要磁路。磁路 1 由极靴内侧沿轴向工作间隙进入衔铁,磁路 2 经套管中的磁性材料段,沿径向工作间隙进入衔铁,两条主要磁路的电磁力曲线合成比例电磁铁的电磁力曲线。

当线圈通过的电流大小一定时,衔铁在 $x_1 \sim x_2$ 位移范围内移动,受力基本保持不变。可以将这段行程设计为比例电磁铁的工作行程,工作行程之外为空行程,空行程长度与工作行程长度相等或近似。非磁性垫圈可以保证比例电磁铁在其特性曲线上的工作行程起点,使比例电磁铁在衔铁的全部工作行程上、磁路中保持一定的气隙,防止落入 $0 \sim x_1$ 空行程,避免衔铁与极靴完全吸合。

力调节型比例电磁铁的推杆输出力 F_M 及线圈电流 i 的关系如上图所示,在工作行程内, F_M 只与线圈电流 i 的大小有关,即可以通过改变线圈电流 i 来实现对推杆输出力 F_M 的线性控制,两者成比例关系。在先导阀芯的另一侧增加一弹性系数匹配的弹簧,即可把力调节型比例电磁铁转化为位移调节型比例电磁铁。弹簧具有线性的力/位移特性,

可作为力/位移转换元件,将推杆输出力 F_M 转化为推杆位移 x ,使可以通过改变线圈电流 i 来线性控制推杆位移 x ,两者同样成比例关系。当线圈电流施加于电磁铁时,产生的电磁力会推动阀芯,直到电磁力与弹簧力达到平衡,即电磁力特性曲线与弹簧特性曲线的交点处。通过改变线圈电流 i ,阀芯可以定位在其工作行程上的任意位置。

在位移调节型比例电磁铁上可以加装检测推杆位移的位移传感器,采集推杆位移作为反馈信号,可以构建比例电磁铁推杆位置的闭环控制系统,从而提高比例电磁铁推杆位移与指令电流信号的比例变化关系的线性程度和抗干扰能力。

高中压调节阀中的电液比例阀属于比例方向流量阀,可以接受连续的电信号控制,并输出一定流量的压力油去油动机控制调节阀动作,且具有切换供油状态和排油状态的换向功能。

以某三代核电厂东汽机组高压调节阀 PV-302A 为例,从润滑油系统 LHS 系统出来的压力油通过压力测点 PP3918,经比例阀至卸荷阀 PV-3018 后侧压紧活塞防止卸油,同时进入油动机前侧,推动活塞使调节阀开启;从高压遮断模块出来的安全油通过压力测点 PP3919,经试验电磁阀 V3914-S 至安全油卸荷阀 PV-3015 后侧,压紧活塞防止卸油。调节阀中卸荷阀远大于安全油卸荷阀,汽轮机跳机时安全油失去,安全油卸荷阀先动作卸油,带动卸荷阀后动作卸油,高中压主汽阀起主要作用;快卸负荷等工况下安全油不失去,安全油卸荷阀不动作,比例阀动作带动卸荷阀卸油,高中压调节阀起主要作用。由于溢流孔 PY-R3016 的存在,压力油通过进油管卸油的速度较慢,此时卸荷阀短暂动作可使压力油通过卸荷阀快速卸去,溢流孔 PY-R3016 还可用于防止开阀速度过快。

先导阀从左往右四个工作位分别为开位、中间位、关位和安全位,主阀从左往右三个工作位分别为关位、中间位和开位。先导阀处于开位时 A1 口进油、B1 口排油,对应主阀阀芯右侧进油、左侧排油,推动阀芯向左移动,主阀 A 口进油,压力油进入油动机,推动活塞使调节阀开度增大,该位置对应的 LVDT 位移传感器信号为 4mA;先导阀处于中间位时 A1、B1 口连通,主阀阀芯左右两侧油压相等,使主阀阀芯保持在中间位置,油动机既不进油也不排油,调节阀开度保持不变,该位置对应的 LVDT 位移传感器信号为 12mA;先导阀处于关位时 B1 口进油、A1 口排油,对应主阀阀芯左侧进油、右侧排油,推动阀芯向右移动,主阀 A 口排油,卸去油动机中的压力油,使调节阀开度减小,该位置对应的 LVDT 位移传感器信号为 20mA。

在正常工作时,比例电磁铁把先导阀芯向右推靠在阀座上,从而封闭先导阀芯钻孔。当先导阀比例电磁铁故障失电时,先导阀座上的偏置弹簧把阀座和阀芯向左推,然后主阀阀芯先导腔中的残余压力把先导阀芯推离阀座,因而主阀阀芯左侧得以通过先导阀芯钻孔向 LHS 油箱泄油,而主阀阀芯右侧经先导阀芯台肩向油箱泄油。此时先导阀处于安全

位, A1 口和 B1 口同时排油, 主阀阀芯左右两侧均失去油压, 在两侧弹簧的作用下恢复至中间位, 油动机既不进油也不排油, 调节阀开度保持不变。油动机油缸中的压力油会通过溢流孔逐渐卸去, 使调节阀缓慢关闭。此时先导阀 LVDT 线圈输出 25mA 电流信号。

3.2 LVDT 传感器

用于比例阀阀芯位置反馈的位移传感器为三线制非接触式 LVDT, 由绕在与电磁铁推杆相连的软铁铁心上的一个初级线圈和两个次级线圈组成。初级线圈由一个高频交流电源供电, 它在铁心中产生变化的磁场, 该磁场通过变压器作用在两个次级线圈中感应出电压。两个次级线圈对置连接, 当铁心居中时, 两个线圈中的感生电压相互抵销, 输出的净电压为零。随着铁心离开中心开始移动, 一个次级线圈中的感生电压提高而另一个次级线圈中的感生电压降低, 从而产生一个净输出电压, 其振幅与铁心位移成比例。该电压信号被送至解调器, 产生一个与铁心位移成比例且极性取决于位移方向的直流信号。^[3]

LVDT 为比例阀位置传感器, 比例阀 LVDT 具有状态判断功能, 当 LVDT 信号出现如下三种状态之一: 1、比例阀 LVDT 插头中任意一根线断线; 2、比例阀 LVDT 插头中任意 2 根线短接; 3、LVDT 的输出电流值小于 2.2mA 或大于 30mA (正常值为 4~20mA), 伺服卡面板的 LVDT 故障灯点亮, 伺服卡根据自身内置逻辑保护关闭高压调阀。伺服卡的工作原理图中, MP4 测试点为比例阀的 LVDT 反馈信号转化后的电压值。比例阀 LVDT 输出的电流值同 MP4 的电压值关系: 4mA → 20mA 对应 -10V → +10V。0↔+10V 对应调阀打开的方向, 阀门全开时, MP4 值约 9.9V; 0↔-10V 对应调阀关闭的方向, 阀门全关时, MP4 值约 -9.3V。伺服卡输出到先导阀的指令为 0-3.2A 电流信号, 当伺服卡的输出指令 > 1.7A 时, 油动机进油, 调阀向开的方向动作; 当伺服卡的输出指令 < 1.7A 时, 油动机泄油, 调阀向关的方向动作。

4 同类电厂经验反馈

2021 年, 某同类电厂 6 号机组处于功率运行模式, 核功率 16.5%FP, 电功率 41MWe。4 号高压调节阀突然异常开启, 1 号蒸汽发生器出现高高水位触发保护动作导致汽轮机停机, 同时叠加 P7 导致反应堆停堆, 经确认最终原因为 4 号高压调节阀比例阀内部 LVDT 信号线与电源线绝缘层破损导致。

5 优化改进建议:

东汽汽轮机控制回路比例阀配置有 1 支先导阀阀位反馈 LVDT、1 支主滑阀阀位反馈 LVDT、调节阀配置 2 支调节阀阀位反馈装置, 其中前 2 支 LVDT 传感器结合 VICKERS 卡共同参与油动机开度控制, 后 2 支调节阀阀位反馈 LVDT 表示调节阀实际开度闭环参与调节阀开度控制。

但整个控制回路存在单点故障的风险, 整个控制回路分为 4 段。

DCS 至就地调节阀控制命令信号;

先导阀阀位反馈信号;

主滑阀阀位反馈信号;

调节阀阀位反馈信号。

按照某三代电厂当前的设计思路, DCS 侧调节阀开命令信号已优化为 2 路冗余设计, 通过 DCS 端子板判断取大值进行输出, 可保证输出信号的可靠性。

由于为单 VICKERS 卡设计, 该卡仅能接受一路命令信号, 一路先导阀和主滑阀 LVDT 反馈信号, 不可避免的成为回路中的单一故障点。此时可从提高 VICKERS 卡的可靠性角度进行优化, 从设计、制造、安装等角度提升可靠性, 设计上应:

首先 VICKERS 卡的供电应考虑 100% 冗余设计。

其次, 要考虑在设计上, 当 VICKERS 卡接收信号故障时触发报警并送至至主控室。

VICKERS 卡在接到断线故障信号时, 能够实现将 LVDT 信号保持为上一时刻的好值, 如此设计并不会给机组带来较大扰动。

目前东汽汽轮机高中压调节阀位置反馈设置 2 路 LVDT 信号, 但实际逻辑中仅有 1 路参与阀位控制, 另 1 路信号仅做显示和备用, 应考虑利用两路 LVDT 信号进行控制, 在 VICKERS 卡中当一路反馈信号故障时产生报警对主控室人员进行提醒。

制造期间, 应重点关注 VICKERS 卡的工厂测试和 LVDT 反馈器的出厂验收工作。

安装及运维期间, 安装时应确保卡件完好及接线、电缆绝缘合格, 定期检查 VICKERS 卡功能和 LVDT 反馈器航空插头。

6 结语

当前东汽汽轮机组的调节阀控制回路仍存在单一失效导致汽机调节阀控制异常的故障点, 对核电运行来说, 该类故障产生的后果是无法接受的, 经分析可对 VICKERS 卡和调节阀的反馈回路进一步进行优化改造, 增加卡件双供电措施, 传感器双反馈回路和必要的报警提示, 同时从设备分级管理上提升该类设备的管理, 增加合理的运维策略和设备关注度, 确保高中压调节阀安全可靠运行。

参考文献

- [1] 赵先国 张敏 ALSTOM 汽机控制系统在岭澳二期核电站的应用[J]. 自动化仪表 2013 34 (02): 61-64
- [2] 李本荣 杨晓东 马宁 压水堆核电站汽轮机非核冲转期间跳闸故障分析及维护[J]. 自动化与仪器仪表 2019 7 (237): 197-199
- [3] 李阳 杨念军 核电厂汽轮机的跳闸故障和维护措施[J]. 科技创新导报 2021 10 (a): 68-70