

660MW 机组单系列给水泵汽轮机双重化伺服冗余控制研究及应用

黄家欢 陈 勇 刘建平 陈绍河

江投国华信丰发电有限责任公司 江西 赣州 341600

摘要: 本文聚焦于660MW超超临界机组单系列给水泵汽轮机伺服控制系统的可靠性瓶颈,深入剖析了传统单伺服控制架构的固有缺陷及其引发的故障根源,进而提出了一种基于双重化伺服冗余架构的创新优化方案。该方案通过集成冗余伺服模块、实施热备冗余模式及开发在线维护功能,显著增强了系统的容错性能与运行稳定性。实践应用表明,此方案有效避免了因单伺服故障、LVDT故障等导致的机组跳闸风险,降低了设备维护成本,为超超临界机组的安全高效运行提供了坚实的技术支撑,同时为同类机组的安全运行提供了可借鉴的范例。

关键词: 单系列;给水泵汽轮机;伺服冗余控制;双伺服架构

0 引言

随着我国电力行业的蓬勃发展与“双碳”战略目标的提出,大型超超临界燃煤机组在追求安全可靠运行的同时,愈发注重成本节约与能效提升。给水系统普遍采用单台100%容量的汽动给水泵组,以实现高精度的给水流量调节。然而,当前给水泵汽轮机伺服控制系统多沿用单伺服模块+单伺服阀或双伺服模块+单伺服阀的控制模式,存在显著的单点故障风险。一旦伺服模块或伺服阀发生故障,可能导致汽泵转速失控,进而引发给水流量异常,甚至触发锅炉主燃料跳闸(MFT),导致机组非计划停运。某2*660MW超超临界机组采用单台小汽轮机(型号:G30-1.2)驱动100%容量给水泵的配置方式,投产以来连续发生两起因给水泵汽轮机伺服控制系统故障导致的机组非停事件。此类事故不仅凸显了单伺服控制

结构的脆弱性,也揭示了单系列给水泵汽轮机在线处理故障的高风险与高难度,迫切需要通过冗余控制技术提升系统可靠性^[1]。

1 给水泵汽轮机伺服控制原理及常见伺服控制结构分析

1.1 给水泵汽轮机伺服控制原理

给水泵汽轮机伺服控制系统的主要作用是接收来自MEH系统(Micro-Electro-Hydraulic Control System,给水泵汽轮机电液控制系统)根据CCS控制中对机组给水流量需求计算后的小汽轮机转速-调门开度指令信号,通过电液转换器(伺服阀)控制油动机的行程及调门开度,线性可变差动变压器式传感器(LVDT)检测调门开度并反馈至伺服卡,形成闭环控制,进而调节汽泵转速。其原理示意图如图1所示。

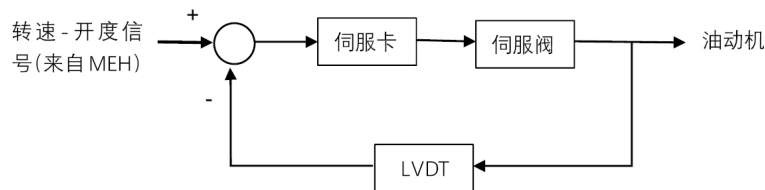


图1 给水泵汽轮机伺服控制原理图

1.2 常见伺服控制结构及分析

目前,传统给水泵汽轮机伺服控制系统多采用单伺服模块+单伺服阀或双伺服模块+单伺服阀控制低压调节阀油动机的方式,反馈测量则采用双支LVDT配置。在处

理LVDT反馈时,存在单伺服模块同时接收双路LVDT反馈,或双伺服模块分别接收一路LVDT反馈或同时接收两路LVDT反馈的差异^[2]。不同配置方式的优缺点如表1所示。

表1 伺服控制的不同结构配置

序号	配置方式	优点	缺点
1	单伺服模块+单伺服阀+双路LVDT	系统结构简洁,逻辑及信号处理方式简单。	除LVDT冗余外,伺服模块及伺服阀均无冗余,任一故障后无法在线处理,容错能力差,系统可靠性不高。

续表:

序号	配置方式	优点	缺点
2	双伺服模块+单伺服阀+双路LVDT	系统结构较复杂, 逻辑及信号处理方式较复杂, 需设置完善的判断及切换条件。设备冗余度较高。	伺服阀单个配置, 冗余度不足, 故障后无法在线处理, 存在可靠性问题。

从表1可以看出, 无论采用哪种结构配置, 均存在单点故障风险、设备维护困难及容错能力差等问题。特别是对于单系列机组而言, 问题尤为突出, 因为单台自动给水泵组停运将直接导致机组停运。在线处理伺服模块、伺服阀及LVDT故障时, 必须确保汽泵转速不变、调门不异常关闭, 以避免机组非停, 这极大地增加了处理难度与风险。

2 伺服冗余控制优化方案

2.1 双重化伺服系统设计

为提升单系列机组系统可靠性并解决在线处理故障的难题, 本文对某2*660MW超超临界单系列机组的给水泵汽轮机伺服控制系统进行了双重化设计。整个伺服控制系统由两套独立的伺服系统构成, 每套系统均采用“双伺服模块+单伺服阀+双LVDT”配置方式。伺服模块选用浙江中控ECS-700的AM723-S11, 伺服阀采用MOOG 761系列, LVDT为无锡河埭TD5000系列^[1]。单套伺服控制系统的结构示意图如图2所示。

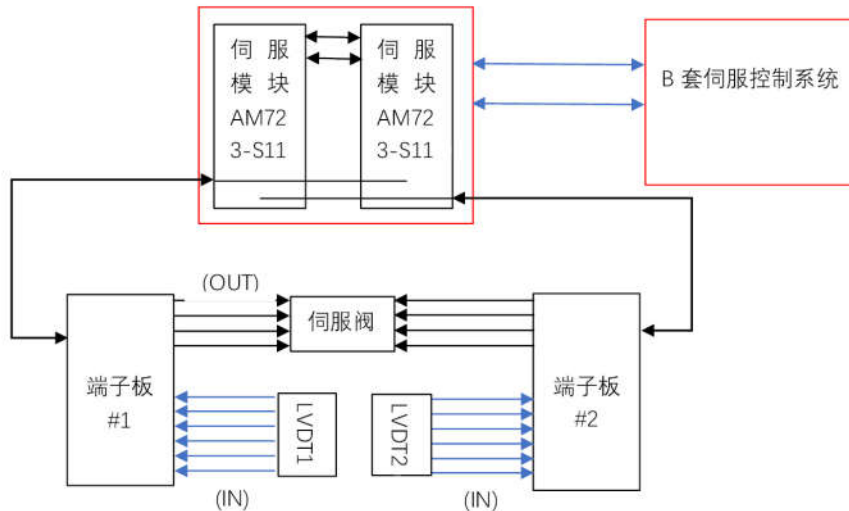


图2 结构示意图

采用此方案后, 双重化的双伺服模块具备并行驱动油动机的能力, 独立的主备模块能够实时同步指令信号与反馈信号。双重化伺服系统处于同时运行状态, 一套系统正常执行指令, 另一套系统则处于实时跟踪模式。当正常运行的伺服系统出现软硬件故障时, 系统会通过自检、互检功能快速判断故障模块, 并迅速、无扰地切换至另一套系统继续运行。这种设计支持在线切换与更换操作, 无需停机进行检修, 有效提升了系统的可靠性与可用性。

2.2 关键技术实现

2.2.1 硬件冗余设计

为实现双重化的伺服系统功能, 在硬件上重新设计了油动机的液压集成块, 采用双MOOG伺服阀并联, 每个伺服阀独立驱动油动机。为便于在线切换及更换伺服阀, 在进回油管路上设置了单独的隔离手动阀 (KA/

KB1- KA/KB4) 及带开关反馈功能的切换电磁阀 (YA/YB)。液压原理图如图3所示。

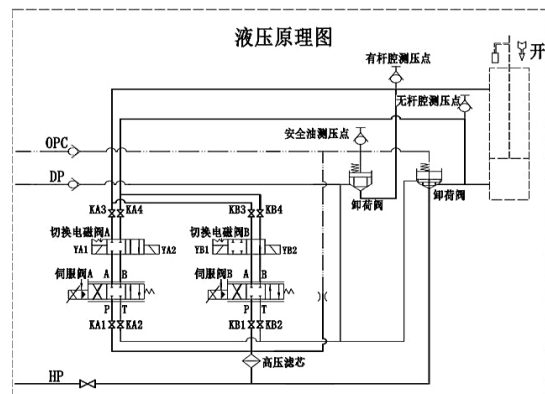


图3 液压原理图

2.2.2 控制逻辑优化:

控制逻辑的优化重点聚焦于如何达成双重化伺服系

统的故障自动识别判断,以及自动对故障伺服阀实施切换、隔离与闭锁操作。具体而言,当MEH系统检测到运行的伺服系统主伺服模块存在故障时,会自主执行伺服模块主备切换流程;而当系统判定伺服阀或伺服模块出现故障时,不仅会进行伺服模块的主备切换,还会同步自动关闭故障通道的切换电磁阀,以此实现故障通道的隔离与闭锁^[4]。

双重化伺服系统自动切换逻辑(任一条件):伺服功能块报警;伺服通讯故障;伺服功能块组态出错;伺服模块故障;伺服LVDT偏差大;伺服供电故障;伺服卡LVDT 15V电源故障;伺服卡处于启动逻辑;伺服卡对应LVDT断线;伺服卡2路DDV输出信号全断线;本路工作时LVDT高选值反馈与总阀位指令偏差超过8%。

切换电磁阀逻辑(以A为例):手动切换或复位;切换电磁阀A关到位,试验投入或发生A伺服系统自动切换条件时联锁打开;切换电磁阀B开到位,试验投入或发生A伺服系统自动切换条件时联锁关闭;

DCS操作画面优化:操作画面设置双重化伺服系统手/自动投切操作、二次确认及显示功能;切换电磁阀投切操作、二次确认及开关状态反馈功能;故障首出及报警功能;LVDT反馈及跟踪指令显示功能。

3 双重化伺服系统功能验证试验及效果分析

3.1 静态功能试验

静态功能试验主要在给水泵汽轮机处于未运行状态时开展,旨在通过一系列相关功能测试试验,验证双重化伺服系统的冗余功能是否正常,以及在故障情况下能否实现自动切换,同时关注切换过程中调门的摆动幅度、切换时间等关键指标。在试验过程中,尤其要重点验证在伺服系统完全故障的极端情况下,设备的安全性是否能够得到保障,确保在发生此类严重故障时,能够正常停运给水泵汽轮机,避免事故扩大和设备损坏。具体试验内容涵盖多个方面:一是对伺服系统进行手动切换操作;二是对伺服阀、切换电磁阀进行测试,并操作调门以观察其响应情况;三是模拟多种故障场景,包括伺服阀故障、伺服模块故障、LVDT故障及偏差过大、伺服系统整体故障等。

在试验中,对伺服阀、切换电磁阀进行了功能测试与遮蔽测试,结果显示二者性能正常,各项测试指标均达到设计标准。双重化伺服系统在切换性能方面表现优异,切换时间可控制在10ms以内,确保了系统在故障发生时能够及时响应。同时,在切换过程中,油动机行程的波动小于0.5%,表明系统切换过程平稳,对油动机的控制精度高。如图4所示。此外,在模拟伺服系统完全故

障的场景下,油缸能够正常且快速地关闭,进一步证明了系统在极端故障情况下的可靠性和稳定性,为给水泵汽轮机的安全运行提供了可靠的技术支撑^[5]。

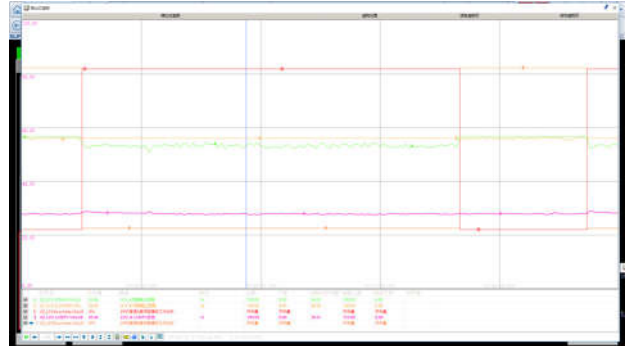


图4 静态试验图

3.2 动态功能试验

动态功能试验是在给水泵汽轮机在一定转速及带负载状态时开展,分为并网前及并网后两个阶段。由于动态功能试验具有一定的风险性,必须在静态试验合格且做好安全风险预控的情况下方可进行。

3.2.1 并网前动态试验

我们选取了给水泵汽轮机转速在1000r/min、2800r/min稳定转速,以及2800~3500r/min变转速这三种典型工况分别开展试验。试验过程中,模拟了伺服阀故障、伺服模块故障、LVDT故障以及切换电磁阀遮蔽等情况。在上述故障模拟情况下,给水泵汽轮机调门开度变化幅度小于0.8%,转速波动控制在小于10r/min,并且给水量始终保持稳定。试验数据充分证明了给水泵汽轮机在复杂故障情况下的稳定性和可靠性。试验趋势图如图5所示。

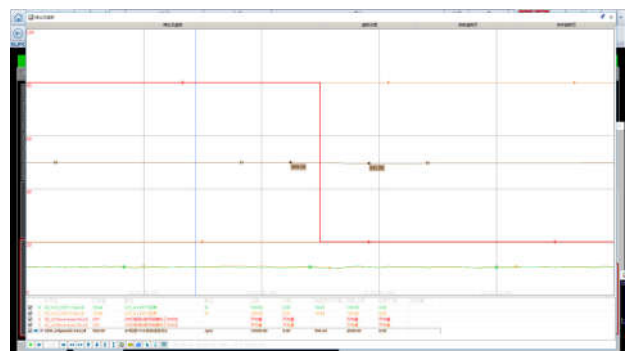


图5 切换试验趋势图(1000r/min)

3.2.2 并网后动态试验

在机组并网并稳定携带50%负荷,且给水泵汽轮机转速达到3500r/min的特定运行工况下,我们开展了与并网前试验相同的操作。试验结果表明,给水泵汽轮机调门开度变化幅度小于1%,转速波动控制在小于15r/min,

并且给水量始终保持稳定, 机组负荷无变化。试验趋势图如图6所示

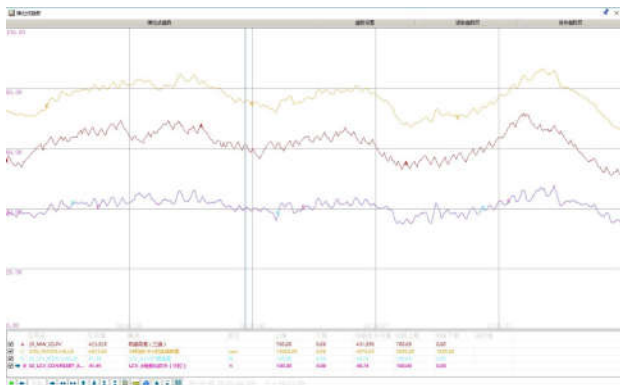


图6 切换试验趋势图(并网后)

综合上述试验, 充分地验证了双重化伺服系统在多个关键层面的性能: 其故障判断机制具有较高准确性, 能够精准识别各类故障; 自动切换逻辑设计完善, 在故障发生时能够迅速、有序地完成切换动作; 隔离系统表现出显著的有效性, 可有效阻断故障的进一步扩散。基于这些验证成果, 为伺服阀、LVDT 等关键设备在出现故障时的在线处理提供了坚实的技术支撑与可靠的操作条件。这不仅确保了给水泵汽轮机能够始终保持正常运行, 而且提升了单系列机组的安全可靠性。

4 结论

本文聚焦于 660MW 机组单系列给水泵汽轮机伺服控

制系统存在的可靠性隐患, 创新性地提出了一套基于双重化双伺服冗余架构的优化方案。该方案综合运用硬件冗余设计、逻辑优化策略以及在线维护功能, 通过严谨的静态与动态功能试验, 充分验证了双重化伺服冗余系统卓越的容错性能与稳定的运行能力。实际应用表明, 该方案有效避免了因单伺服故障、LVDT故障等导致的机组跳闸事故, 降低了设备维护成本, 为机组的安全经济运行提供了技术保障, 为同类机组的安全运行提供了参考。

参考文献:

- [1]王伟杰,曹耀武.火电机组给水泵汽轮机液压控制系统全过程双冗余控制优化设计[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(8)[2022-08-01].
- [2]胡轶群,廖荣泽,黄文生,等.给水泵汽轮机调节汽阀冗余控制的实现及应用[J].工业仪表与自动化装置,2022,(03): 114-119.
- [3]吴意,林蕾,陈雪林,等.在伺服阀阀位反馈装置故障状态下的汽轮机阀门油动机控制优化[J].热力发电,2013,42(12): 115-117.
- [4]郭凌云,李涌斌.给水泵汽轮机伺服控制系统LVDT故障分析及处理[J].电力科学与工程,2011,27(12):69-72.
- [5]杨保,左立安.300MW机组DEH和MEH伺服卡故障分析及处理[J].吉林电力,2007,35(5):51-53.