

汽机侧热控参数动态特性及优化调节策略分析

林彩云

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350512；

摘要：本文对汽机侧热控参数动态特性及优化调节策略的相关理论研究进行了系统梳理与综述。首先界定了蒸汽温度、压力、流量和汽轮机转速等关键热控参数，分析了其动态特性及内外部影响因素，阐述了机理建模法、数据驱动建模法等动态特性数学建模方法，以及各参数的动态响应特性。接着，探讨了传统调节策略、先进控制策略和多变量协调控制策略等优化调节策略，并以某 600MW 机组为实例，详细说明相关策略在实际中的应用效果。最后，总结了该领域的研究现状与存在问题，并对未来研究方向进行了展望，旨在为该领域的进一步发展提供理论参考。

关键词：汽机侧；热控参数；动态特性；优化调节策略

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.031

引言

汽轮机组是电力生产核心设备，其运行状态直接影响电力系统的稳定性与经济性。汽机侧热控参数（如蒸汽温度、压力、流量和汽轮机转速等）在机组运行过程中动态变化复杂。这些参数的动态响应不仅反映机组实时工况，更是决定机组能否安全高效运行的关键。随着电力工业的快速发展，对汽轮机组的运行要求愈发严苛。因此，深入研究汽机侧热控参数动态特性、构建科学合理的优化调节策略成为当前研究的焦点。本文对汽机侧热控参数动态特性及优化调节策略的理论研究进行系统梳理与综述，总结现有成果、剖析存在问题并展望未来方向，为该领域的发展提供理论参考。

1 汽机侧热控参数动态特性理论研究

1.1 关键热控参数界定与特性描述

汽机侧热控参数是保障汽轮机组正常运行的重要监测与控制对象，其中蒸汽温度、压力、流量和汽轮机转速最为关键。蒸汽温度影响热效率与安全运行，其高低决定蒸汽焓值，高温高压蒸汽利于热能转化，但温度过高会缩短设备寿命，过低会降低效率、引发水蚀，且其动态特性有较大惯性和延迟，受锅炉燃烧等因素影响。蒸汽压力体现做功能力，其动态变化与锅炉燃烧调整等相关，压力过高可能损坏设备，过低则使机组出力不足。蒸汽流量反映进汽量，与输出功率直接相关，流量快速变化会影响机组稳定性。汽轮机转速是保证电力系统频率稳定的关键，其动态变化取决于输入与输出功率平衡关系，需维持在额定值附近。以某 600MW 超临界机组为例，冷态启动阶段，主蒸汽温度需按每分钟 2~3℃ 从环境温度升至 540℃，避免热冲击。当机组负荷从 300MW

升至 600MW 时，主蒸汽流量从 800t/h 增至 1800t/h，压力从 16MPa 升至 24.1MPa，汽轮机转速稳定在 3000rpm \pm 5rpm。满负荷运行时，再热蒸汽温度偏差需控制在 \pm 5℃ 以内，确保做功平衡。

1.2 动态特性影响因素理论分析

汽轮机组内部结构和工作原理是影响热控参数动态特性的内在因素。通流部分结构如叶片型线、级间间隙等影响蒸汽流动状态，改变蒸汽压力、温度和流量的动态特性，级间间隙过大会影响参数稳定性。转子惯性、轴承摩擦等影响转速动态特性，转子惯性越大，转速对负荷变化响应越慢，轴承摩擦变化会影响转速稳定性。外部因素主要有电网负荷变化、锅炉运行工况等。电网负荷波动会导致汽轮机输出功率变化，引起蒸汽流量、压力和转速等参数动态变化，如负荷突然增加，蒸汽参数会相应变化。锅炉运行工况对汽机侧热控参数动态特性影响重大，锅炉燃烧效率等影响蒸汽温度和压力，燃烧不稳定会影响机组运行稳定性。在一次电网负荷突降 100MW 事故中，汽轮机调节汽门迅速关小，主蒸汽压力 10 秒内从 23MPa 升至 25.9MPa，超过安全阈值 25.87MPa，触发安全阀动作。事后分析表明，锅炉磨煤机出口温度波动 \pm 15℃，造成炉膛热负荷不稳定，主蒸汽温度 30 秒内波动达 \pm 8℃，加剧了压力波动。此外，该机组高压缸第 1、2 级间级间间隙因长期磨损从 0.5mm 增至 1.2mm，蒸汽泄漏量增加 15%，主蒸汽压力动态响应延迟时间从 2 秒增至 5 秒。

1.3 动态特性数学建模方法

为深入研究汽机侧热控参数动态特性，建立数学模型是有效手段。目前常用机理建模法和数据驱动建模法。

机理建模法基于汽轮机组物理、化学过程,通过守恒方程描述热控参数动态变化,如蒸汽温度动态建模,能反映系统内在机理,但模型复杂、涉及难测参数。数据驱动建模法利用系统运行数据,通过机器学习等方法建模,无需了解系统内部机理,适用于复杂系统,但对数据要求高,模型泛化能力受训练数据限制。实际应用中,常将两种方法结合成混合建模方法,先通过机理建模确定基本结构,再用数据驱动方法优化修正参数,以提高准确性和适用性。针对该 600MW 机组,研究团队先基于能量和动量守恒定律建立主蒸汽温度机理模型,传递函数为 $G(s)=e^{(-20s)}/(1+60s)^2$, 纯延迟时间 20 秒、惯性时间常数 60 秒。但机组负荷低于 30% 额定值时,模型预测误差达 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。为此,收集机组 168 小时满负荷试运行期间 5000 组运行数据,用 LSTM 神经网络修正机理模型,引入 8 个辅助变量,使模型在全负荷范围内预测误差降至 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,满足工程应用要求。

1.4 动态响应特性理论研究

汽机侧热控参数动态响应特性指参数受扰动后从初始到新稳定状态的过程特性,主要指标有响应速度、超调量、调节时间等。理论上,蒸汽温度动态响应有较大延迟和惯性,受扰动(如锅炉燃烧量变化)时,经热量传递和积累才达新稳定值,响应缓慢升降、超调量小;蒸汽压力动态响应速度较快,蒸汽流量变化时迅速反应,响应或有超调但调节时间短,因其变化取决于蒸汽质量平衡,压缩性小使压力快速调整;蒸汽流量动态响应与阀门调节特性密切相关,阀门开度变化时流量迅速改变,响应速度取决于阀门动作速度和蒸汽流动阻力,理想时近似一阶惯性环节;汽轮机转速动态响应受调节系统控制,电网负荷变化时转速偏离额定值,调节系统依偏差调进汽量使转速恢复,其特性取决于调节系统 PID 参数、转子惯性等,良好调节系统应使转速响应快、超调量小。

在该 600MW 机组扰动试验中,锅炉燃煤量阶跃增加 10% 时,主蒸汽温度从 540°C 升至 545°C ,调节时间为 180 秒,超调量仅 2°C ;主蒸汽压力 20 秒内从 22.73MPa 升至 23.41MPa,超调量 3%,随后 40 秒内稳定至 23MPa。汽轮机高调门阶跃开大 5% 时,蒸汽流量 5 秒内从 1800t/h 增至 1900t/h,基本无超调。电网负荷突增 50MW 时,汽轮机转速最低降至 2985rpm,经调节系统作用,15 秒内恢复至 3000rpm,超调量小于 1rpm。

2 汽机侧热控参数优化调节策略理论研究

2.1 传统调节策略

2.1.1 PID 控制策略

PID 控制是经典控制方法,在汽机侧热控系统广泛应用。其原理是根据系统偏差(设定值与实际值差值),通过比例(P)、积分(I)、微分(D)环节组合计算控制量以消除偏差。比例环节能快速响应偏差,但有稳态误差;积分环节可消除稳态误差、提高精度,却会增加超调量和调节时间;微分环节能预测偏差趋势、提前调整,减小超调量、提高稳定性。在汽机侧热控参数调节中,合理设置 P、I、D 参数可有效控制蒸汽温度、压力、流量和转速等参数。不过,传统 PID 控制策略对具有非线性、大惯性、时变特性的汽机侧热控系统难以取得理想效果,在参数整定和适应性方面有局限。该 600MW 机组原蒸汽温度控制系统采用常规 PID 调节,参数为 $P=0.8$ 、 $I=60\text{s}$ 、 $D=10\text{s}$ 。机组负荷稳定时,温度控制偏差维持在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$;负荷以 10MW/min 速率变化时,最大偏差达 $\pm 12^{\circ}\text{C}$,调节时间超 5 分钟。一次机组甩负荷至 30% 额定值试验中,因 PID 参数无法自适应调整,导致再热蒸汽温度过低,触发汽轮机中压缸喷水减温保护动作。

2.1.2 前馈-反馈控制策略

前馈-反馈控制策略结合了前馈与反馈控制优点。前馈控制依扰动因素变化提前调控制量,抵消扰动对系统输出的影响;反馈控制据系统偏差调节,消除剩余偏差。在汽机侧热控系统,已知主要扰动因素(如电网负荷、锅炉燃烧量变化)时可用此策略。如蒸汽温度控制,将锅炉燃烧量变化作前馈信号提前调减温水量,结合蒸汽温度反馈信号微调,提高控制精度与响应速度。该策略能减小扰动影响,但前馈补偿器设计需了解扰动与系统输出关系,复杂扰动因素设计难度大。针对问题,机组改造为前馈-反馈控制系统:将负荷指令作前馈信号,经函数发生器算预减温水量,负荷从 300MW 升至 600MW 时,前馈通道提前 15 秒将减温水量从 50t/h 增至 120t/h;反馈通道用 PID 调节精确修正,使负荷变化时温度偏差控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,调节时间缩至 90 秒。实际运行显示,该策略使减温器阀门动作次数减少 30%,延长设备寿命。

2.2 先进控制策略

模型预测控制(MPC)是一种基于模型的先进控制方法,核心是建立预测模型,利用当前和过去信息预测未来输出,计算最优控制量并仅执行当前时刻控制。在汽机侧热控参数调节中,它能处理约束、实现多变量协调控制,如转速和蒸汽压力联合控制。MPC 具良好鲁棒性和适应性,但对模型精度和计算量要求高。应用于 600MW 机组时,建立预测模型,预测时域 30 秒、控制时域 5 秒,在电网 AGC 指令调节下,提升功率响应速率至 5%/min,降低压力波动至 $\pm 0.2\text{MPa}$,满足“两个细则”

要求。

自适应控制能根据系统状态自动调整控制器参数以维持性能,主要有模型参考自适应和自校正控制两种类型。模型参考自适应通过比较实际输出与参考模型调整参数;自校正控制在线辨识参数并实时调整。在汽机侧热控中,它适应参数变化,提高抗扰动能力,但算法复杂。应用于 600MW 机组时,采用模型参考策略,以新机状态为参考模型,通过自适应律修正 PID 参数,在高压缸效率下降时维持转速响应水平,减少非计划停机。

智能控制是人工智能与控制理论的结合,包括模糊控制、神经网络控制和专家系统控制。模糊控制基于模糊规则,适用于非线性系统;神经网络控制利用自学习能力建模;专家系统模拟专家决策。在汽机侧热控中,如除氧器压力控制采用模糊-PID 复合策略:偏差大时用模糊控制快速调节,小时用 PID 精调。实际应用使压力波动降至 $\pm 0.01\text{MPa}$,改善给水含氧量指标。

2.3 多变量协调控制策略

汽机侧热控系统是多变量、强耦合复杂系统,参数相互影响显著。采用多变量协调控制策略对提升系统整体性能至关重要。该策略通过建模、分析耦合关系、设计协调控制器,使参数满足控制目标并实现整体优化,常用方法包括解耦控制、鲁棒控制等。解耦控制通过设计解耦器消除变量耦合,将系统转为单变量控制,可消除温度、压力、流量间的耦合影响。鲁棒控制可在参数不确定和存在扰动时保证系统稳定性和性能,提升对工况变化和参数摄动的适应能力。某 600MW 机组实施该策略:利用解耦矩阵将主蒸汽与再热蒸汽温度的耦合度从 0.7 降至 0.1;采用 H_∞ 鲁棒控制确保参数摄动 $\pm 20\%$ 时系统稳定。单侧燃烧器跳闸扰动下,主汽温偏差仅 4°C ,再热汽温偏差 5°C ,机组负荷稳定在 500MW 以上,避免降负荷。改造后机组等效可用系数提高 0.5%,年增发电量约 200 万 kWh。

3 研究现状与存在问题

3.1 研究现状

近年来,国内外学者在汽机侧热控参数动态特性及优化调节策略方面开展大量研究。动态特性研究上,结合机理分析与实验测试,建立较完善的参数动态响应模型,如蒸汽温度传递、压力动态模型等;数据驱动建模技术有突破,深度学习算法构建的预测模型在 300MW 机组实现主蒸汽压力 $\pm 0.1\text{MPa}$ 预测精度。调节策略研究方面,传统 PID 控制不断优化,自适应、模糊 PID 等改进算法在 300MW 及以上机组广泛应用,某 600MW 机组用模

糊 PID 后主蒸汽温度控制精度提升 40%。先进控制策略中,模型预测控制在超临界机组协调控制推广,某 660MW 机组应用 MPC 后 AGC 响应速率达标率从 75%提至 98%;自适应控制在变工况运行适应性好,某 350MW 机组用自校正控制后负荷变动压力波动减 60%。智能控制技术应用增多,神经网络控制蒸汽流量预测误差 $\pm 2\%$,专家系统用于故障诊断与策略切换,某电厂用专家系统使机组非正常停机次数减 30%。多变量协调控制策略有进展,解耦与鲁棒控制结合处理参数耦合效果好,某 600MW 机组采用后多参数协同控制精度提高 50%。

3.2 存在问题

虽汽机侧热控参数动态特性及优化调节策略研究有进展,但仍有问题。动态特性研究中,现有数学模型多基于理想工况,对实际非线性、时变特性和复杂扰动考虑不足,如某 600MW 机组高低负荷时蒸汽温度模型误差大;且对多参数耦合机理研究不深,影响控制策略设计。优化调节策略方面,先进控制策略理论多、应用少,模型预测控制对硬件要求高,某 600MW 机组因控制器运算能力不足影响控制效果;自适应控制算法复杂,调试维护难。多变量协调控制策略设计不成熟,处理强耦合、大延迟系统效果欠佳,某机组负荷快速变化时参数波动超允许范围。新能源接入后,电网对汽轮机组调峰能力和响应速度要求提高,现有策略难满足,某 600MW 机组深度调峰时因蒸汽温度响应滞后影响调峰效果。

4 结论

汽机侧热控参数动态特性及优化策略研究对汽轮机组意义重大。本文综述该领域理论,含动态特性、影响因素、建模及控制策略等,结合 600MW 机组案例。现存问题包括模型精度不足、控制策略难应用等。需深入研究特性,结合大数据提高模型精度;加强工程化应用,开发智能策略。探索新能源电网下热控参数特性,结合虚拟电厂等技术。未来应加强跨学科融合,推动研究发展。

参考文献

- [1]叶福南.珠海电厂热控设备检修模式优化研究[D].华南理工大学,2015.
- [2]王永宏,唐爽,江彬,等.单轴燃气-蒸汽联合循环机组 FCB 控制策略研究与应用[J].工业加热,2024,53(1):24-28. DOI:10.3969/j.issn.1002-1639.2024.01.007.
- [3]华东六省一市电机工程学会.热工自动化.第2版[M].中国电力出版社,2006.