

汽轮机低负荷运行稳定性控制策略

高 滨

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘 要】：低负荷运行成为联合循环机组常态工况，汽轮机在此状态下易出现振动增大、参数波动及效率下降等问题，影响机组安全与供热稳定。针对典型三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置联合循环机组运行特性，构建热力参数协调控制、抽凝工况调节及控制逻辑优化策略，实现燃机与汽机分轴协同运行。通过对供热与纯凝工况切换过程优化，显著降低低负荷运行波动幅度，提高运行稳定性与能效水平。

【关键词】：汽轮机低负荷运行；稳定性控制；联合循环机组；抽凝工况调节；协同控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.023

引言

电力系统负荷结构变化加剧，联合循环机组承担调峰与供热双重任务，低负荷运行时间显著延长。运行工况由额定状态向非设计区间转移后，汽轮机内部流动特性发生变化，蒸汽参数波动与转子受力不均问题逐渐显现，振动水平与热效率同步受到影响。典型三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组，在抽凝与全凝运行方式切换过程中，运行边界更加复杂。燃气轮机与蒸汽轮机分轴布置，天然气燃料驱动下的负荷响应特性差异，使系统协同控制难度提升。如何在多工况切换与低负荷运行条件下保持参数稳定与设备安全，成为运行优化中的关键问题，控制策略的精细化设计成为核心突破方向。

1 三菱 M701F4 型双轴联合循环机组运行结构与工况基础

1.1 “一拖一”双轴布置系统构成特征

额定功率为 484.22MW 的联合循环机组采用“一拖一”双轴结构，燃气轮机与蒸汽轮机分别配置独立发电机，形成相对解耦又具协同关系的动力系统。燃机中位布置并采用侧进气方式，有利于进气流场均匀稳定，降低入口扰动对压气机运行的影响；汽轮机中位布置且轴向排汽，有助于缩短排汽路径并减小背压波动。无补燃三压再热余热锅炉位于系统核心位置，承担烟气能量梯级回收功能，使高、中、低压蒸汽系统形成连续供能链。分轴运行方式增强了负荷调节灵活性，但也对控制系统协调能力提出更高要求，需要在多源动力输入条件下实现热力参数与电功输出的动态平衡。

1.2 三压再热余热锅炉与汽轮机耦合关系

三压再热余热锅炉通过高、中、低压蒸汽系统向汽轮机提供多级能量输入，其蒸汽参数直接决定汽轮机各级通流状态与做功能力。高压蒸汽进入高压缸后经再热返回中压系统，再进入中压缸与低压缸完成膨胀过程，形成完整的热力循环路径[1]。锅炉侧换热过程受燃机排烟温度与流量影响显著，在负荷变化过程中蒸汽温度、压力及流量呈现非线性响应特征。汽轮

机对蒸汽品质的敏感性使两者之间形成紧密耦合关系，任一侧参数波动均会传递至另一侧并放大系统不稳定性。通过优化蒸汽分配与再热控制，可提升热量利用效率并改善低负荷运行下的通流均匀性。

1.3 抽凝与全凝运行方式切换特性

供热运行状态下，汽轮机采用抽凝方式，将部分蒸汽在中低压段抽出用于供热，改变了通流结构及膨胀终点压力分布，使低压缸负荷降低并引起排汽参数变化。非供热状态下转为全冷凝运行，蒸汽全部进入凝汽器完成热量释放，系统热效率与排汽条件均发生调整。两种运行方式在切换过程中涉及抽汽量、再热温度及凝汽压力等关键参数的协同变化，若控制不当易产生热冲击与压力波动。分轴结构下燃机与汽机负荷响应节奏存在差异，切换过程需要精确匹配燃气侧与蒸汽侧能量输入，以维持转速稳定与功率输出连续性，同时保证供热需求与发电效率之间的动态平衡。

2 低负荷区间机组热力响应与运行状态变化

2.1 天然气燃机负荷下降对蒸汽参数影响

低负荷运行阶段，燃气轮机燃料输入减少，排烟温度与烟气流速同步下降，余热锅炉吸收的热量显著减弱，直接导致高、中、低压蒸汽系统压力与温度水平下移。蒸汽生成速率降低使主蒸汽流量减少，过热度与再热温度控制难度增大，易出现温度偏差扩大与波动频繁的情况。烟气参数变化呈现滞后特性，使蒸汽侧响应存在时间差，导致热力系统动态不稳定增强。蒸汽品质下降还会改变汽轮机通流效率，使能量转换过程产生附加损失，进一步加剧低负荷工况下整体热力状态的不均衡。

2.2 分轴结构下燃机与汽机功率分配变化

分轴布置使燃气轮机与蒸汽轮机各自承担独立发电任务，低负荷运行时两者功率变化路径呈现差异化特征。燃机侧负荷调整速度较快，输出功率随燃料调节迅速变化，而汽机侧受蒸汽生成与传递过程制约，功率响应相对滞后[2]。功率分配比例在动态变化过程中易出现偏离设计工况的情况，导致系统内部能量匹配程度下降。发电机负荷分担不均会引起频率调节压力

增加,同时对调速系统与自动控制逻辑提出更高要求,需要在不同时间尺度上协调两类动力源的输出节奏,维持电功与热功的稳定耦合关系。

2.3 轴向排汽条件下汽轮机流动特性演变

轴向排汽结构在低负荷工况下对汽轮机末级流场产生显著影响,蒸汽流量下降使末级叶片处相对速度与压力分布发生变化,流动均匀性降低。排汽截面利用率下降导致局部回流与涡流增强,增加气动损失并影响叶片受力状态。凝汽器背压波动在低流量条件下更易传递至低压缸内部,形成压力扰动,进而影响整机稳定性。流动状态由接近设计工况向偏离区间转变,可能引起湿蒸汽比例上升,对叶片冲蚀与效率衰减产生不利影响,需要通过参数调节维持排汽端流动结构的相。

3 低负荷运行稳定性影响因素机理分析

3.1 蒸汽流量不足引起的汽轮机热偏差

低负荷运行阶段蒸汽生成量下降,高、中、低压缸进汽流量不足,导致各级膨胀过程偏离设计通流条件。蒸汽流动能力减弱使局部压力分布不均,热力参数在不同级段间产生梯度偏差,进而引发热应力重新分布。再热蒸汽温度控制难度增加,温差扩大使转子与静子部件受热不均,形成轴向与径向热变形。低流量状态下蒸汽干度变化明显,湿蒸汽比例上升,加剧末级叶片气动特性恶化。热偏差的持续积累会影响轴系稳定性与密封性能,使汽轮机运行偏离最佳效率区间,进而放大系统整体波动。

3.2 燃机与汽机响应不同步导致的系统扰动

燃气轮机负荷调节依赖燃料供给变化,响应速度较快,而蒸汽系统受余热锅炉传热与蒸汽生成过程限制,动态响应存在明显滞后。负荷调整过程中,燃机功率快速变化与汽机输出变化不同步,形成瞬时功率失衡,导致系统频率与压力出现波动[3]。蒸汽参数变化延迟传递至汽轮机,使调节系统在短时间内难以实现精准匹配,控制指令易产生超调或滞后效应。分轴结构强化了两类动力源之间的独立性,使耦合协调依赖控制系统精度,若调节策略不完善,扰动会在多环节传递并叠加,形成复杂的动态不稳定过程。

3.3 抽凝供热工况下热负荷波动传递路径

抽凝运行条件下,部分蒸汽从中低压段抽出用于供热,蒸汽流量分配发生改变,通流结构与压力场同步调整。供热负荷变化直接作用于抽汽量,改变汽轮机内部能量分配比例,并通过蒸汽系统向余热锅炉与燃机侧反馈。热负荷波动经由抽汽调节阀传递至各级蒸汽管道,引起压力与温度的动态波动,进而影响再热过程稳定性。抽汽量变化还会改变低压缸排汽条件,使凝汽器负荷与背压产生联动响应。多路径传递机制使热负荷扰动在系统内呈现放大效应,对控制系统实时调节能力与参数匹配精度提出更高要求。

4 面向双工况运行的稳定性控制策略优化

4.1 抽凝工况下供热与发电协同调节方法

抽凝运行条件下,供热需求与发电负荷呈现耦合关系,需通过精细化参数协调实现双目标平衡。抽汽调节阀作为核心执行单元,其开度变化直接决定供热蒸汽流量与汽轮机通流状态,应构建以供热负荷为主导、发电功率为约束的动态调节机制。高、中、低压蒸汽系统之间需建立联动调节逻辑,通过优化再热温度与主蒸汽压力设定值,维持各级缸体热力状态均衡。针对低负荷区间蒸汽流量波动问题,引入分段控制策略,对抽汽量变化进行缓冲调节,降低对低压缸排汽条件的冲击。同时强化凝汽器背压与抽汽量之间的耦合控制,避免热负荷波动引起的排汽不稳定。通过多参数协同调节,使供热输出与电功率变化保持平稳过渡,提升系统整体运行的协调性与稳定性。

4.2 全冷凝工况下汽轮机参数稳定控制路径

全冷凝运行状态下,蒸汽全部进入凝汽器,汽轮机通流结构恢复至完整膨胀模式,但低负荷条件下蒸汽参数波动对稳定性影响更加显著。控制路径需围绕主蒸汽压力、再热温度及凝汽器真空度进行综合调节,通过稳定主蒸汽流量维持高压缸入口参数的连续性[4]。再热系统应强化温度控制精度,避免中压缸入口温差扩大导致热应力集中。凝汽器侧需保持稳定真空水平,降低背压波动对低压缸排汽流动的干扰,提升末级叶片工作稳定性。针对蒸汽流量不足引发的通流偏差,可通过优化给水调节与锅炉侧换热过程,提高蒸汽品质一致性。整体控制路径以热力参数稳定为核心,通过多环节闭环调节,实现汽轮机在低负荷全凝状态下的平稳运行。

4.3 燃机中位布置条件下负荷协调控制逻辑

燃机中位布置形成相对对称的气流与设备分布结构,有利于运行稳定,但在低负荷条件下对负荷协调控制提出更高要求。燃机输出功率变化通过烟气参数传递至余热锅炉,再由蒸汽系统反馈至汽轮机,形成跨系统耦合调节链。控制逻辑需构建以燃机负荷为前馈信号、汽机功率为反馈修正的双通道控制结构,实现燃气侧与蒸汽侧的动态匹配。针对负荷快速下降过程,应限制燃机负荷变化速率,使蒸汽系统具备足够响应时间,避免产生功率失衡。汽机侧调节系统需根据蒸汽参数变化进行实时修正,通过调速与阀门控制维持输出稳定。通过建立多时间尺度协调机制,使燃机快速响应特性与汽机缓慢响应特性形成互补关系,保障分轴运行条件下整体负荷分配的连续性与稳定性。

5 控制策略实施后的机组运行稳定性提升路径

5.1 关键运行参数波动抑制效果分析

控制策略优化实施后,主蒸汽压力、再热蒸汽温度及蒸汽流量等关键参数的波动幅度明显收敛,热力系统由原有的多源

扰动叠加状态转变为相对平稳的动态响应过程。通过建立燃机负荷前馈与汽机参数反馈相结合的控制结构,烟气侧与蒸汽侧之间的能量传递更加顺畅,蒸汽生成与消耗保持协调,避免了负荷调整过程中参数突变现象。抽凝工况下抽汽量变化对低压缸排汽压力的影响得到有效缓冲,凝汽器真空度维持在较窄波动区间,排汽端稳定性显著增强。多级蒸汽系统压力分布趋于均衡,减少了局部超调与滞后带来的热冲击风险。参数调节过程呈现出响应速度适中、过渡平滑的特征,使低负荷区间运行状态由频繁波动转向连续稳定,整体热力过程一致性明显提高。

5.2 机组振动水平与能效指标改善情况

运行参数稳定性提升直接作用于轴系受力状态,汽轮机转子热偏差得到控制,轴向与径向热变形幅度减小,振动响应水平呈下降趋势。低压缸末级叶片在稳定排汽条件下受力分布趋于均匀,流动分离与涡流现象减弱,气动激励降低,使振动频谱结构更加集中且可控。分轴运行条件下燃机与汽机负荷匹配程度提高,减少了功率波动引起的机械扰动传递路径[5]。能效方面,蒸汽品质稳定使膨胀过程更加接近设计工况,通流效率提升,单位发电量对应的热耗下降。再热系统温度控制精度提高,降低了热损失与能量无效释放。整体运行状态由低效波动区间向相对稳定高效区转移,使机组在低负荷条件下仍保持较高

的能源利用水平。

5.3 多工况切换下稳定运行模式形成机制

多工况切换过程中,通过引入分阶段控制与参数预调机制,使抽凝与全凝两种运行状态之间的过渡更加平稳。抽汽调节、主蒸汽压力及再热温度在切换前进行预先匹配,减少切换瞬间的参数突变幅度,形成连续的热力路径转换。燃机负荷变化速率受到约束,与蒸汽系统响应时间相匹配,避免因动力输入不均导致的系统冲击。控制系统内部建立多层级协调逻辑,对关键参数设置动态边界,使各环节在切换过程中始终处于可控区间。蒸汽流量分配路径在不同工况间实现有序调整,压力场与温度场变化保持连续性,抑制热应力集中。通过长期运行数据反馈修正控制策略,使机组逐步形成适应不同负荷与工况的稳定运行模式,提升系统在复杂运行环境下的适应能力与调节精度。

6 结语

低负荷运行条件下,联合循环机组稳定性取决于热力系统与控制逻辑的协同匹配程度。针对蒸汽参数波动、功率分配失衡及工况切换扰动等关键问题,构建多维度调节机制后,机组运行状态趋于平稳,振动水平与能效指标得到优化。多工况协调控制体系逐步形成,运行过程连续性与可控性显著增强,为复杂负荷条件下机组高效稳定运行提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] 王怀亮,李海明.低负荷运行条件下汽轮机效率的提升研究[J].中国设备工程,2025,(21):143-145.
- [2] 苏天亨,刘艺.垃圾焚烧电站汽轮机低负荷高背压运行分析[J].科技创新与应用,2023,13(31):168-171+176.
- [3] 张勇,马义良,石岭,等.核电汽轮机低压末级叶片低负荷运行安全性研究[J].汽轮机技术,2022,64(5):374-376+333.
- [4] 王雷,曲优.汽轮机变负荷运行时级内参数及损失变化分析[J].汽轮机技术,2021,63(5):385-389.
- [5] 赵大朋,范双双,孙天中,等.汽轮机低负荷单阀-顺序阀无扰切换运行的优化控制方法[J].节能技术,2021,39(2):165-168.