

火电厂机组（330MW机组）深度调峰下的能耗特性分析及节能运行优化策略

王瑞虎

华电新疆红雁池发电有限公司 新疆 乌鲁木齐 830047

摘要：330MW机组作为火电厂主力机组，在深度调峰过程中常面临负荷波动大、运行工况偏离设计值、能耗显著上升等问题，制约机组节能效益与调峰能力的提升。本文以330MW机组为研究对象，通过设计科学的试验方案，系统分析不同调峰深度下机组的能耗变化规律，识别能耗异常的关键工况与核心成因，重点从锅炉、汽轮机、辅机三大系统出发，提出针对性的节能运行优化策略，为330MW机组深度调峰节能运行提供理论支撑与实操参考。

关键词：330MW机组；深度调峰；能耗特性分析；节能运行优化

引言

当前，330MW机组凭借其容量适中、运行灵活的优势，在电力系统调峰中承担着重要角色，但深度调峰运行时，机组需在电网现货市场模式下大幅降负荷至最低稳燃负荷，长期偏离设计最优工况，导致燃烧效率下降、辅机运行失衡、能耗显著攀升，不仅增加火电厂运营成本，也制约了机组调峰潜力的充分发挥。现有研究多聚焦于机组深度调峰的技术实现，对330MW机组深度调峰下能耗特性的系统性分析不足，且优化策略缺乏针对性，难以适配机组低负荷运行的复杂工况。

1 330MW 机组基本原理与结构

330MW机组作为火电厂主力机组之一，其运行依托多系统协同作用，核心是将燃料的化学能转化为电能，整个能量转换过程贯穿各关键系统，形成完整的生产闭环。（1）发电机的核心作用是将汽轮机传递的机械能转化为电能，通过电磁感应原理实现能量转换，保证电能的稳定输出，满足电网供电需求。辅机系统作为机组的配套支撑，涵盖风机、水泵、换热器等各类设备，负责为主体设备提供冷却、润滑、通风等辅助服务，辅机的运行效率虽不直接参与核心能量转换，但对机组整体能耗和运行稳定性有着重要影响，是机组正常运转不可或缺的组成部分。（2）机组正常运行与深度调峰运行的核心差异，主要体现在负荷需求、运行参数和系统工况三个方面^[1]。正常运行时，机组负荷维持在45%-100%负荷附近，运行参数稳定，各系统处于最优工况，燃料燃烧充分，能耗处于较低水平，此时机组的核心目标是保障电能稳定输出，满足电网基本供电需求。而深度调峰运行时，机组需要根据电网调度要求，大幅降低负荷至20-30%或很快增加到高负荷运行，负荷波动幅度大且频繁，

运行参数偏离设计最优值，导致燃料燃烧效率下降，辅机运行负荷与主机负荷不匹配，进而引发能耗上升，并且机组运行的稳定性也面临更大挑战。（3）深度与灵活调峰的定义是指机组在额定负荷以下，根据电网灵活调峰需求，时常会将机组降低负荷至最低稳燃负荷的运行状态，其核心目的是平衡电网中新能源发电的波动性，保障电网频率和电压稳定。调峰幅度是衡量深度调峰能力的关键指标，通常以额定负荷与最低稳燃负荷的差值来表示，330MW机组的调峰幅度需结合机组自身设备状况、燃料特性等因素综合确定。

2 330MW 机组深度与灵活调峰下能耗特性试验与分析

2.1 试验方案设计

（1）试验机组概况是方案设计的前提，需全面掌握机组的核心信息，为工况设置和数据采集提供依据。机组参数涵盖额定负荷、锅炉蒸发量、汽轮机进汽参数等核心指标，这些参数决定了机组的调峰潜力和能耗基准，是分析能耗特性的基础参照。运行年限直接影响机组设备的老化程度和运行效率，服役时间较长的机组可能存在部件磨损、密封性能下降等问题，会对深度调峰下的能耗产生影响。改造情况主要包括机组近年来的节能改造、调峰能力改造等内容，改造后的机组在低负荷稳燃、辅机效率等方面会有明显变化，需在试验中重点考量，确保试验数据能够反映机组当前的实际运行水平。（2）试验工况设置要围绕深度调峰的核心需求，全面覆盖不同运行场景，确保试验数据的全面性和代表性。不同调峰深度是工况设置的核心，要从机组最低稳燃负荷到额定负荷，划分多个负荷梯度，逐一测试各梯度下的能耗特性，明确负荷变化与能耗的关联规律。负

荷持续时间需结合电网实际调峰需求设置,既要考虑短期大幅调峰的工况,也要兼顾长期低负荷运行的场景,避免因工况单一导致试验结果片面。(3) 试验数据采集与整理是试验方案的关键环节,直接决定能耗特性分析的准确性。数据整理过程中,需剔除异常数据,对有效数据进行分类、汇总和校验,确保数据的可靠性,为后续的能耗特性分析奠定坚实基础。

2.2 不同调峰深度下能耗特性分析

(1) 从最低稳燃负荷至额定负荷区间,机组能耗呈现出清晰的变化规律。随着调峰深度的增加,机组负荷逐步降低,能耗整体呈上升趋势,且在低负荷区间上升幅度更为明显。这是因为负荷降低时,机组偏离设计最优工况,燃料燃烧效率下降,热量损失增加,同时辅机运行负荷未能同步匹配,导致单位发电量的能耗显著上升,而接近额定负荷时,机组运行工况稳定,能耗维持在较低水平,形成“低负荷高能耗、高负荷低能耗”的整体特征。(2) 关键运行参数对能耗的影响贯穿整个调峰过程,其中汽温、汽压和过量空气系数的影响最为显著。汽温、汽压偏离设计值会直接降低汽轮机通流效率和锅炉换热效率,导致能量损耗增加,进而推高能耗^[2]。过量空气系数不合理则会影响锅炉燃烧效果,系数过高会增加排烟热损失,过低则会导致燃料燃烧不充分,两种情况都会加剧能耗上升,需精准控制参数范围以降低能耗。(3) 锅炉、汽轮机、辅机系统的能耗占比及变化特征,随调峰深度呈现明显差异。额定负荷下,锅炉和汽轮机作为核心做功系统,能耗占比较高,辅机系统能耗占比相对较低。随着调峰深度增加,锅炉燃烧效率下降,其能耗占比略有上升;汽轮机因负荷降低,能耗占比有所下降;而辅机系统因负荷调整滞后,运行效率下降,能耗占比显著上升,成为低负荷调峰时能耗增加的主要来源。

2.3 能耗异常问题识别与原因分析

(1) 深度调峰下,能耗偏高的关键工况主要集中在低负荷稳燃区间,尤其是负荷大幅波动和长期低负荷持续运行的时段。负荷快速下降或上升时,机组各系统运行参数难以快速适配,易出现工况紊乱,进而引发能耗骤升;而长期维持最低稳燃负荷运行时,机组持续偏离设计最优工况,能量损耗不断累积,能耗始终处于较高水平,成为能耗异常的主要时段,这一特征在调峰幅度较大时更为突出。(2) 能耗异常的核心原因围绕燃烧、辅机运行和参数控制三个核心维度展开。燃烧不充分是低负荷调峰时最常见的原因,负荷降低后燃料供给量减少,煤粉混合均匀度下降,火焰稳定性变差,部分燃料

未能充分燃烧就排出,造成能量浪费,推高能耗。辅机效率偏低同样加剧能耗异常,低负荷时辅机未能及时调整运行状态,负荷与主机不匹配,导致辅机能耗占比飙升。(3) 不同调峰模式的能耗差异显著,滑压运行与定压运行在深度调峰场景下各有优劣。滑压运行时,主汽压力随负荷变化同步调整,更贴合低负荷工况下的能量需求,能有效降低汽轮机节流损失,减少能耗;而定压运行时,主汽压力保持恒定,低负荷下节流损失增大,且锅炉燃烧效率下降更为明显,能耗相对更高,尤其在深度调峰的低负荷区间,这种能耗差异更为突出。

3 330MW 机组深度调峰节能运行优化策略

3.1 锅炉系统节能优化

锅炉系统作为330MW机组能量转换的核心,其运行状态直接决定深度调峰下的能耗水平,因此锅炉系统节能优化需围绕低负荷稳燃与能耗降低双重目标,结合机组运行特性,从燃烧、受热面清洁、运行参数三个维度精准发力,实现节能与稳燃的协同提升,避免顾此失彼。(1) 燃烧优化是锅炉系统节能的核心抓手,核心是适配深度调峰下的低负荷工况,兼顾燃烧充分性与稳定性。煤粉细度需根据负荷变化动态调整,低负荷时适当细化煤粉,提升煤粉与空气的混合均匀度,促进燃料充分燃烧,减少未燃尽损失,同时避免煤粉过细增加制粉能耗,实现燃烧效率与制粉能耗的平衡^[3]。配风方式需精准调控,优化一次风、二次风的配比与送入方式,增强火焰稳定性,抑制低负荷时的结渣、积灰问题,减少热量损耗。燃烧器调整则需结合负荷变化优化角度与投入方式,确保火焰中心合理,提升炉膛换热效率,让燃料能量充分转化为蒸汽热能。(2) 受热面清洁优化重点解决深度调峰下受热面积灰、结渣导致的热损失上升问题,核心在于科学调整吹灰时机与方式。低负荷运行时,炉膛温度较低,积灰、结渣速度相对加快,若吹灰不及时会降低受热面换热效率,增加排烟热损失。要依据受热面污染程度、负荷变化趋势,合理设定吹灰间隔与时长,避免盲目吹灰增加能耗,并优化吹灰介质用量,兼顾清洁效果与能量节约,最大限度降低受热面热损失。(3) 锅炉运行参数优化需摒弃固定设定模式,根据调峰深度动态调整汽温、汽压、炉膛负压等关键参数的最优设定值。低负荷时,适当优化汽温、汽压设定,避免参数过高导致的能量浪费,同时确保参数稳定,保障锅炉安全运行。炉膛负压需精准控制,避免负压过大增加排烟量与热损失,负压过小则可能导致炉膛正压漏风,影响燃烧效率,通过动态优化参数,实现锅炉运行效率的最大化。

3.2 汽轮机系统节能优化

(1) 调峰工况下滑压运行曲线优化是汽轮机节能的核心举措,核心在于摒弃固定压力运行模式,根据不同调峰深度动态确定最优主汽压力。深度调峰时,机组负荷从额定值降至最低稳燃负荷,若维持固定主汽压力,会导致汽轮机阀门节流损失急剧增加,大量蒸汽能量在节流过程中损耗,推高整体能耗。优化后的滑压运行曲线,要结合各负荷区间的运行特性,准确匹配主汽压力与负荷的对应关系,负荷降低时同步降低主汽压力,减低阀门节流损失。(2) 汽轮机间隙密封优化与通流效率提升,重点解决深度调峰下因负荷波动导致的密封间隙变大、通流损耗增加的问题。低负荷运行时,汽轮机转子与静子的温度分布发生变化,易导致密封间隙增大,部分高温高压蒸汽会通过间隙泄漏,无法充分推动转子做功,造成能量浪费^[4]。优化过程中需结合机组运行年限和设备磨损情况,优化密封结构,减小密封间隙,抑制蒸汽泄漏。(3) 回热系统运行优化是汽轮机节能的重要补充,核心在于通过优化加热器投运方式和水位调整,提升回热效率,减少能量损失。深度调峰时,机组负荷降低会导致回热系统参数波动,若加热器投运方式不合理或水位控制不当,会降低回热效果,增加机组耗煤量。根据调峰深度动态调整加热器投运台数和运行方式,避免低负荷时过度投运加热器造成的能量浪费,同时精准控制加热器水位,避免水位过高导致蒸汽带水、换热效率下降,或水位过低导致加热器干烧、损坏设备,通过优化回热系统运行状态,最大限度回收利用蒸汽余热,降低机组整体能耗。

3.3 辅机系统节能优化

(1) 风机、水泵等辅机变负荷运行优化,是辅机系统节能的核心抓手,核心在于打破传统固定运行模式,根据主机负荷变化动态调整辅机运行状态,最大限度提升辅机运行效率。变频调节技术的合理应用是关键,通过变频装置精准调控辅机转速,让辅机出力与主机负荷需求精准匹配,避免低负荷时辅机仍维持额定转速运行造成的能量浪费。相较于传统的节流调节,变频调节可大幅减少辅机运行过程中的节流损失。(2) 台数组合

优化则需结合辅机的额定容量、运行效率以及主机负荷需求,合理搭配辅机投运台数,避免单一辅机超负荷运行或多台辅机低负荷并列运行的情况^[5]。深度调峰时,随着主机负荷的降低,需逐步减少辅机投运台数,优先投入运行效率较高的辅机,并根据负荷波动趋势,提前预判辅机运行需求,避免频繁启停辅机造成的能耗损耗,确保辅机在不同调峰深度下均能处于高效运行区间。

(3) 辅机与主机负荷的协同匹配策略,是辅机节能优化的关键保障,核心在于实现辅机运行状态与主机负荷变化的同频联动,避免两者脱节导致的能耗浪费。深度调峰过程中,主机负荷会出现快速波动,辅机系统需建立精准的负荷响应机制,实时捕捉主机负荷变化信号,同步调整辅机出力、投运台数和运行参数,确保辅机供给与主机需求精准匹配。

结语

综上所述,节能优化策略可有效降低机组深度调峰下的能耗水平,提升机组运行稳定性与调峰灵活性,具有显著的经济与环境效益。但本研究仍存在一定局限,后续可进一步结合智能控制技术,构建机组深度调峰能耗智能优化模型,实现运行参数的实时动态调控,同时探索多机组协同调峰的节能模式,进一步挖掘机组节能潜力。

参考文献

- [1]景杰,张艳辉,郭洪远,等.330MW等级直接空冷机组乏汽供热与电蓄热锅炉调峰运行经济性分析[J].汽轮机技术,2025,67(1):68-72+80.
- [2]袁名扉.双碳目标下火电汽轮机深度滑压运行的能耗特性分析与参数优化[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026,(3):025-028.
- [3]金利鹏,赵佳骏,吴剑波,等.330 MW亚临界机组深度调峰运行优化研究[J].节能技术,2021,39(2):127-131.
- [4]张振宇,王刚,刘宗奎,等.330 MW机组深度调峰控制系统问题分析及优化[J].能源研究与管理,2021,(2):119-123.
- [5]苏玉强.330 MW火电机组深度调峰下AGC控制及优化[J].应用能源技术,2023,(11):18-22.