 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9326

Analysis of operational stability and research on optimization and retrofit strategies for water supply systems under deep peak shaving

Jiawei Yang

Shantou Huadian Power Generation Co., Ltd. Shantou, Guangdong, 515000, China

Abstract

After the large-scale integration of renewable energy into the power grid, deep peak shaving of thermal power units has become a core means to ensure grid stability. When operating under such conditions, frequent and significant fluctuations in unit load pose severe challenges to the operational stability of the feedwater system. This paper focuses on analyzing the core issues faced by the feedwater system during deep peak shaving, examining the internal mechanisms behind its decreased stability, and proposing a precise optimization and retrofit plan based on this analysis. The research begins by analyzing the factors affecting stability from three perspectives: system pressure fluctuations, flow regulation characteristics, and equipment reliability; it combines simulation and case analysis to evaluate the fit between existing control logic and equipment performance. From the aspects of optimizing control strategies, upgrading key equipment, and improving system configuration, a comprehensive plan is proposed to enhance the stable operation level of the feedwater system under wide load and varying operating conditions. This provides theoretical support and practical reference for thermal power units to safely and efficiently participate in deep peak shaving.

Keywords

Deep peak shaving; Water supply system; Operational stability; Optimization and renovation; Thermal power unit

深度调峰下给水系统运行稳定性分析与优化改造策略研究

杨嘉伟

汕头华电发电有限公司，中国·广东 汕头 515000

摘　要

在新能源大规模接入电网后，火电机组深度调峰已成为保障电网稳定的核心手段。按此工况操作时，机组负荷频繁大幅波动，对给水系统运行稳定性构成严峻挑战。本文重点剖析深度调峰过程中给水系统面临的核心问题，分析它稳定性下降的内在机制，并基于此拿出精准地优化改造方案。研究先从系统压力波动、流量调节特性及设备可靠性三个角度分析稳定性影响因素；联动仿真与案例分析，测评现有控制逻辑与设备性能的契合度；从优化控制策略、换代关键设备、改良系统配置等层面，推出一套提升给水系统宽负荷、变工况下稳定运行水平的综合方案，为火电机组安全、高效参与深度调峰提供理论支撑与实践借鉴。

关键词

深度调峰；给水系统；运行稳定性；优化改造；火电机组

1 引言

在能源结构转型和“双碳”目标推动下，电力系统急需具备灵活调节能力的电源。尤其燃煤机组，正由传统基荷运行切换到深度调峰角色，频繁以低负荷甚至超低负荷状态工作。给水系统是火电机组的关键辅机系统，需为锅炉输送连续、稳定且流量精准的给水，直接关乎锅炉安全运行和机组整体效率。实施深度调峰操作时，机组负荷大幅波动，造成给水流量、压力、温度等参数大幅波动，给水泵、调节阀、控制系统等面临严苛考验。传统设计工况对应的运行模式已无法适配，给水系统工作状态不稳，有概率引发锅炉汽包水位失控、省煤器欠水或过冷等安全问题，还会降低蒸汽品质和机组经济性。因此，细致剖析深度调峰时给水系统运行稳定性相关问题，并挖掘有效地优化改造路径，对保障机组调峰安全、延长设备寿命、强化电网消纳新能源能力意义重大。本文从理论分析和工程实践结合的层面出发，全面研究这个课题。

【作者简介】杨嘉（1997—），男，中国吉林长春人，本科，助理工程师，从事给水系统运行研究。

2 深度调峰给给水系统运行稳定性带来的主要影响分析

2.1 系统压力与流量的宽范围剧烈波动

深度调峰运行要求机组负荷在 30% 至 100% 额定出力

这类宽幅区间内快速增减，这直接要求锅炉的给水流量做出大幅、高频的调节。持续运行低负荷工况，给水流量或许会降至设计值的 1/4 甚至更低，让整个给水管道系统的流体动力学特性出现根本性变化。管道内介质流速急速下跌，沿程阻力排布不均，易在部分管段（如省煤器入口集箱）诱发局部压力大幅振荡或流量分配不均，危及换热安全。为跟进负荷指令，流量调节系统需要实施大幅度的迅疾动作，这让依赖给水泵转速调节或给水调节阀开度控制的传统系统面临极大挑战。当控制系统动态响应特性与锅炉实际蓄热、蒸发过程不匹配时，很容易出现给水流量超调或调节滞后，大幅破坏汽包水位的动态平衡，引发水位大幅波动，启用保护程序，危害机组安全稳定运行。

2.2 给水泵运行工况恶化与可靠性风险

给水泵属于给水系统核心动力供给端，其实施深度调峰要应对长期低负荷运行带来的严峻挑战。泵的实际运行位置与设计高程区偏差极大，陷入低流量、高压头的非稳定工况范围。这类偏差直接造成泵的运行效率明显下滑，造成额外的厂用电耗增长，还将触发一系列影响设备可靠性的机械问题 [1]。泵内介质升温提速，易引发入口处气蚀，侵蚀叶轮及密封；叶轮承受的径向水力推力失去平衡，可能引发转子剧烈振动，破坏轴承工作状态。长时间在这类恶劣工况下运行，会加速泵内部件（如密封环、轴承、轴）的疲劳和老化磨损，大幅缩减机组寿命。即便调节范围更宽的变频调速给水泵，以极低流量运行，泵壳内部流体循环受阻引发的散热难题以及低转速下轴承油膜形成的稳定状态，还是待破的技术关键障碍，直接影响泵组的长周期安全运行。

2.3 传统控制策略适应性不足

当下普遍采用的锅炉给水自动控制策略，机组设计和参数整定基本依托高负荷区间（通常为 70%—100% 额定负荷）稳定运行的经验，机组实施深度调峰，遇到大范围、快速度的负荷变动。这类传统策略的适配能力短板愈发明显，提前设定的固定 PID 控制参数、针对稳态工况设计的前馈补偿模型、汽包水位三冲量控制逻辑，动态推进中无法精准配合。负荷快速下降阶段，由汽机第 1 级压力折算得到的蒸汽流量信号，其响应迟滞和给水流量测量信号的动态特性差异显著，剧烈变动会放大这种不一致性，引发控制系统误判，单冲量（仅水位）与三冲量（水位、蒸汽流量、给水流量）控制模式的切换逻辑存在失稳可能，引发调节机构反复振荡，最终导致汽包水位控制品质大幅下降，自动投入占比降低。运行人员多次切换为手动干预模式，这不光显著加重操作负担与精神压力，更会在关键步骤增添人为误操作风险，危及整个机组的协调控制与安全经济性。

3 给水系统运行稳定性评估与关键问题诊断

3.1 基于动态仿真的系统特性评估

为精准评估给水系统深度调峰工况下的动态特性，要建立一套包括给水泵、调节阀、管道网络、省煤器及汽包等核心设备的精细化全工况动态仿真模型。该模型应能模拟机组按典型低负荷曲线运行的所有环节，全方位量化不同变负荷速率、低负荷稳燃点对给水压力、流量、汽包水位等关键参数的动态作用。能清晰地展示系统各类工况下的稳定运行边界、潜在流量—压力共振区间，同步识别控制回路的敏感环节和显著滞后特性。仿真结果为后续给水控制系统参数整定、调节逻辑优化及相关设备适应性改造提供可靠定量依据，切实避免深度调峰实际操作中可能出现的系统振荡、调节失控等运行风险，增强机组宽负荷区间的安全性与调控品质。

3.2 关键设备性能边界测试与诊断

针对正在服役的给水泵、前置泵、液力耦合器或变频器等关键设备，需实施专项性能试验和运行状态评估。主要测定低流量工况下的最小连续安全流量、有效汽蚀余量、振动频谱及轴承温升等参数，明确设备当前实际的安全稳定工作区间 [2]。要测试调节阀在低开度下的流量特性曲线，校验线性度、调节分辨率及空行程大小，排查是否存在卡涩、漂移等问题，能否实现深度调峰阶段给水流量的精细平稳调节，精准把握设备性能上限，为设备改造、更换或优化控制策略敲定具体目标。

3.3 现有控制逻辑的适应性分析

收集机组深度调峰时段数据，尤其要关注负荷大幅变动阶段的历史运行数据，获取给水控制系统相关参数的趋势记录。深挖自动模式里汽包水位的波动幅度、稳定恢复时间，另含调节阀开度指令、泵速指令和实际反馈的跟踪曲线。把实际响应和理想控制效果做对比，可诊断现有控制逻辑应对大范围快速负荷扰动的缺陷，诸如 PID 参数在不同负荷段适应能力差、前馈信号与实际需求不吻合、三冲量控制权重配置不合理、逻辑切换条件出现滞后或突变等具体问题，给逻辑优化定好方向。

4 提升给水系统运行稳定性的优化改造策略

4.1 控制策略与逻辑的精细化优化

迎合火电机组深度调峰阶段频繁、大幅的负荷波动，要对给水自动控制系统做兼具精细化与前瞻性的优化设计。关键是强化控制系统的鲁棒性和响应速度，采用传统固定参数的 PID 控制。当负荷快速越过设计点时，控制质量大幅下降，要设计应用适配宽负荷范围波动的变参数 PID 控制策略，或采用模型预测控制、模糊控制这类先进算法，让控制器参数依据机组实时运行工况（如主蒸汽压力、汽包水位、负荷指令）做动态调整，做到全负荷区间内均可实现快速、无超调的高精度调节。针对前馈核心的蒸汽流量信号做深度处理，优化与给水流量配套的动态补偿模型，需要兼顾热力系统的时滞特性，需添加负荷变化率（dN/dt）的动态修正，给前馈作用加上预测属性，提前抵消负荷大幅升降造成的热

力系统蓄热变化，明显提升控制系统抗衡剧烈扰动的水平。

应对机组深度调峰中可能频繁跨越三冲量与单冲量控制切换点的问题，一定要优化切换逻辑，完成“无扰”且“智能”的过渡，改进方案要依托更全面的判断条件，并非只有负荷阈值[3]。综合考量负荷指令变化趋势、主蒸汽压力变化率、汽包水位变化趋势及稳定性等多方面内容，智能决策最优切换时机与控制模式。负荷骤降时，哪怕未达理论切换点，但预测水位会因蓄热释放快速上升，系统可提前平缓切换为单冲量模式，防止控制模式切换引发新扰动。可导入凭借历史数据或机理模型的负荷预测模块，预判未来 1—5 分钟这类短时的负荷变动路径，把它设为前馈信号，提早作用给水控制系统。构建“预测—前馈—反馈”闭环，显著强化系统应对深度调峰挑战的“预知”与“先发”调节能力，维持汽包水位的终极安全稳定。

4.2 关键设备的适应性升级与改造

深度调峰要求给水系统核心设备具备远超额定工况的宽范围稳定运行能力，聚焦诊断发现的设备瓶颈实施定向升级改造是关键手段。针对给水泵，首要工作是保障极低流量下的安全，排查优化最小流量再循环系统，保障再循环阀调节特性、快开 / 快关功能及再循环管路通流能力达标，必要时可采用多级再循环或加设低负荷专用再循环回路，严防泵内汽蚀及过热，进一步扩大高效稳定运行范围。可对泵的通流部件实施改造，比如换成针对宽负荷运行设计的叶轮、优化导叶流道、调整动静间隙等，部分水泵可考量采用可调叶片的实际可能，用物理方法适配更宽流量波动。

聚焦调节执行机构环节，传统调节阀开度较小时常出现线性偏差大、部件易损耗、易引发空化气蚀等状况。需替换为专门设计的高精度、低泄漏、抗汽蚀调节阀，采用多级降压阀芯、迷宫式阀芯这类先进结构，保障全行程拥有优质线性调节特性及使用寿命。对依旧采用液力耦合器调速的系统，需全面核算改为高压变频调速的技术经济成本收益，变频调速拥有以下特点：调节范围更宽（可从零转速启动）、调节精度更高、响应速率更快，低负荷阶段节电效果显著，可彻底挖掘水泵的调节潜力，让它能平稳精准地跟进极低负荷到满负荷的全部指令，从根源上强化给水系统适配深度调峰的能力，需为泵配套升级轴承、密封等辅助系统，维持它在频繁变转速工况下的长期可靠性。

4.3 系统配置与运行方式的改进建议

结合全厂给水系统配置和运行策略开展顶层设计，应对深度调峰挑战的进阶解决方案。系统性优化的关键方向，是判断“大小泵配置”方案的可行性。不撤出现有大容量主给水泵的前提下，加配一台专用低负荷给水泵，采用小容量（额定流量为主泵的 20%—30%）、全容量变频调速设计。机组深度调峰达到低负荷阶段，切换为小泵运行，让主泵停止运行或维持热备用状态。这类配置模式可让运行中的泵始终保持高效安全运行，防止主泵在低效区间运转造成的能耗高、磨损大、安全性差问题，同时借助小泵出色的低负荷调节能力，精细调节汽包水位，是破解深度调峰下水泵运行难题的可行办法。

要对给水系统管路及附属设施开展全面评估和优化，排查并加固可能因流量大幅波动引发振动或水锤的薄弱管段及支吊架，必要时增设阻尼器或水锤消除装置，调整管路走向降低流动阻力突变。从“软件”层面，务必制定《深度调峰工况给水系统专项运行规程》并严格落实。该规程需细化明确不同负荷段，抓实运行人员专项培训与事故演练，增强对深度调峰工况下给水系统异常现象（如流量波动、水位振荡、泵气蚀征兆）的识别、判断及应急处置能力。结合“硬件配置优化”和“运行策略精细化”，从整体层面提升给水全链条在深度调峰工况下的适应性和可靠性。

5 结语

综上所述，火电行业发展新型电力系统必须落实深度调峰要求，也让包含给水系统的机组关键辅机系统，面临前所未有的运行稳定性挑战。本文围绕深度调峰期间给水系统遭遇的压力流量波动、设备工况恶化、控制策略适配性问题完成系统分析，说明通过动态仿真、性能诊断、逻辑分析实施评估与诊断的方法。基于这一前提，制定综合优化改造策略，联动控制策略优化、关键设备改造及系统配置完善 3 个层面同步发力，需要将先进且适应性强的控制算法、宽工况性能优良的设备以及合理的系统设计融合到一起，才能从根源上提升给水系统在宽负荷、快变工况下的稳定性和可靠性，为火电机组安全、高效、灵活参与深度调峰铺好坚实底色。在未来，伴随调峰需求升级和技术发展，智能化、自适应优化是给水系统的核心发展方向。

参考文献

[1] 朱亚鹏,王福宁,胡晓花.深度调峰模式下给水系统优化研究与应用[J].机电信息,2019,(27):37-39.

[2] 程亮,林琳,温斌,等.深度调峰火电机组汽动给水系统及配汽系统优化[J].发电设备,2024,38(04):211-216.

[3] 孙晓东,姜东娇,任益,等.超临界火电机组深度调峰时给水系统控制方法改进[J].东北电力技术,2022,43(08):21-23.