

# 新型电力系统下电厂汽机深度调峰运行特性研究

李嘉芃

内蒙古能源集团金山热电有限公司 内蒙古呼和浩特 010000

**摘要:** 新型电力系统以新能源大规模接入为显著特征, 而风电、光伏等新能源具有间歇性和波动性, 给电网调峰带来更大挑战, 电厂汽机是主要调峰设备, 在深度调峰运行中起着重要作用。本文基于电厂实际情况出发, 不涉及过多的数据及理论内容, 从汽机在新型电力系统下的深度调峰运行情况进行探讨, 总结出一些常见问题, 并结合现场操作经验给出相应建议, 希望可以给相关工作人员带来一定帮助, 促进电厂汽机安全平稳高效地进行深度调峰工作, 从而有利于新型电力系统的健康发展。

**关键词:** 新型电力系统; 电厂汽机; 深度调峰; 运行特性

## 引言

在“双碳”目标背景下, 我国能源结构正加快向清洁低碳转型, 在此过程中新型电力系统逐步形成, 新能源发电装机比例不断提高, 但是由于新能源发电波动性大对电网负荷平衡很大困难。传统的火电机组主要负责基本负荷供电任务, 调节能力较弱, 无法满足新的电力系统运行要求, 所以汽轮机深度调峰是必然趋势<sup>[1]</sup>。本文基于某厂实际运行情况, 分析了在新类型电力系统中汽轮机进行深度调峰时的一些特点以及遇到的问题等, 避免泛泛而谈, 给现场运行人员带来一定的借鉴意义。

## 一、新型电力系统下电厂汽机深度调峰的运行环境与核心要求

### (一) 运行环境特点

风电、光伏等清洁能源不仅出力呈现随机性、波动性, 而且此类新能源场站地理位置具有分布式特点, 导致电力系统的源侧出力不稳定, 从而使得供电稳定性、可靠性难以得到保证。VPP利用软件系统及新一代双向通信技术, 结合天气数据对风电、光伏出力进行预测。当电网调节能力不足时, 可向新型电力系统中的灵活性资源(新型储能、可控负荷)发送调节指令, 实现快速响应并获取收益, 从而提高供电可靠性<sup>[2]</sup>。

新型电力系统的主要特点是新能源高比例并网, 这对电厂汽机的工作条件造成很大变化, 在传统电力系统中, 电网负荷变化率较低, 波动幅度较小, 主要是由于风力发电、光伏发电等新能源出力受气候条件以及时间段的影响较大, 在白天光伏出力达到最大值的时候可能

会与电网负荷高峰出现偏差, 在夜晚风电出力起伏较大, 导致汽机需要经常进行负荷调节以达到深度调峰的目的来缓解电网负荷波动的问题。而且新型电力系统对于调峰的速度以及精度都有更高的要求, 除了要让汽机能迅速降低到很低的负荷状态之外, 在低负荷状态下也要保证其稳定性并且可以随时应对电网负荷恢复的需求, 这对汽机的安全可靠性以及灵活性都提出了更大的考验。

### (二) 核心运行要求

根据新型电力系统运行需求及火电机组运行规程, 汽轮机深度调峰运行应符合以下几点基本条件: 第一是安全性与稳定性, 在进行深度调峰过程中, 由于汽轮机负荷大幅度降低而偏离正常工作范围, 容易产生叶片振动、胀差不平衡以及轴向推力过大等问题, 因此必须保证汽轮机各部分安全可靠地工作, 防止出现设备损坏或者停机事故; 第二是调节能力, 在接到调度指令后可以迅速改变机组负荷大小并能及时恢复到原来的水平, 在低负荷范围内(额定负荷的20%~50%)稳定运行并且具有良好的调节性能; 第三是经济性和环保性, 在进行深度调峰时, 汽轮机效率有所降低, 需要改进操作方法减少能量损耗的同时还要保证排烟污染指数以及噪声值达到环境保护的要求, 从而做到安全、高效、清洁生产<sup>[3]</sup>。

## 二、新型电力系统下电厂汽机深度调峰的核心运行特性

### (一) 热力特性: 参数波动加剧, 能量利用效率下降

汽轮机热力性能受蒸汽参数及通流状况影响较大, 在深度调峰过程中, 负荷降低造成蒸汽流量大幅度下降,

从而引起一系列热力参数变化。从实际运行情况看,首先是主蒸汽、再热蒸汽参数不稳定,在低负荷情况下,锅炉产汽量减少,主蒸汽压力、温度都会有所下降并且波动幅度增大,如果调整不当就会使蒸汽参数超出规定值范围,影响到汽轮机工作效率;其次就是通流部分流动情况变差,由于负荷较低使得蒸汽流量较小,通流部分内蒸汽流速降低,叶片表面边界层加厚,气流分离严重,出现涡旋和流动损失,这不仅会降低汽轮机内部效率还会加速叶片表面磨损程度缩短设备寿命。

同时,在深度调峰过程中汽机排汽特性也会发生变化,由于排汽量减少造成凝汽器热负荷下降,如果循环水泵操作不当就会出现真空度降低以及排汽温度上升的情况,从而对汽机运行不利,甚至会造成低压缸变形等安全事故。另外,在低负荷状态下汽机回热系统效率也会有所下降,给水温度降低进而使锅炉耗热量增大,整个厂用电率升高,这是电厂进行深度调峰所面临的最主要经济损失问题。

## (二) 机械特性: 部件受力不均, 安全风险凸显

汽机深调峰过程中,机械部件承受载荷情况发生变化,与设计工况下承受载荷不同步,造成各种安全隐患凸显,在实际运行中应予以重视。首先是叶片系统安全风险,低负荷情况下蒸汽流量减少,叶片容易达到颤振边界,引起强烈振动,长时间运转会造成叶片疲劳损伤,另外由于湿蒸汽区域增大,叶片受到冲刷作用增强,也会降低叶片强度,在实际运行中有部分机组在进行深调峰操作时低压缸末级叶片出现异常振动现象,如果不及时采取措施,就会导致叶片断裂从而引发重大事故<sup>[4]</sup>。二是胀差及动静摩擦的风险,在低负荷下,蒸汽温度与金属温度匹配困难,如果冷却速度过快,则容易产生负胀差过大问题,从而引起隔板和转子之间的碰撞,最坏情况下甚至会导致设备卡涩。另外,高压、中压缸胀差不均也会使轴向间隙减小,进而加大动静摩擦的可能性。三是轴向推力突变,负荷突然降低后,平衡盘两侧压力差变化较大,造成较大的轴向推力,使得推力轴承发热,一旦超出允许范围就会烧毁推力轴承而不得不进行停机检查。而且在低负荷状态下,汽轮机转子受到的热应力频繁波动,反复升降温会对转子造成很大损耗,降低其寿命。

## (三) 调节特性: 调节难度增加, 响应精度下降

新型电力系统对于汽机调峰的速度以及精度的要求更高,在进行深度调峰的过程中,汽机调节性能的变化

使得调节难度加大,响应精度降低。一方面,在低负荷情况下,汽机调节阀开度较小,节流损失较大,阀门控制精度降低,很难做到精确地调整负荷,易造成负荷大幅波动的现象发生,不能及时响应电网负荷指令;另一方面,在深度调峰过程中,汽机调节系统与锅炉系统的配合程度降低,锅炉燃烧稳定性减弱,产汽量波动较大,从而影响到汽机负荷调节的效果,“负荷调整滞后”、“参数波动联动”的情况时有发生。

## (四) 辅助系统特性: 协同性下降, 运行隐患增加

汽机深调峰运行不仅涉及主机自身,还牵涉锅炉、凝汽器、循环水泵等一系列附属设备,在低负荷情况下,这些附属设备的工作状况都会有所改变,配合程度降低,容易产生各种问题。第一是锅炉系统的配合不足,在低负荷时炉膛热负荷下降,燃烧稳定性变差,易发生熄火或爆燃现象;第二是锅炉给水量减少,易造成“假水位”,不利于汽轮机安全稳定运行。二是凝汽器系统工作失常,在低负荷下凝汽器热负荷不够,真空度无法保持住,如果循环水泵操作不当就会使排汽温度上升而引起低压转子弯曲变形,同时还会导致凝汽器积灰结垢严重,降低换热效果。三是润滑油系统运行不稳定,在低负荷情况下虽然汽轮机转速维持在额定值,但是润滑油温度、压力会有起伏变化,如果润滑油系统控制不好就会造成轴承油膜稳定性降低而引起轴承振动加剧,严重时还会烧坏轴瓦;另外低负荷状态下环保辅助设备配合度也会有所下降,例如脱硝催化剂入口烟气温度下降使脱硝效果减弱,容易发生超标排放现象给发电厂增加环保负担。

## 三、新型电力系统下电厂汽机深度调峰运行的优化措施

### (一) 优化热力运行方式, 提升能量利用效率

为了解决深度调峰过程中热力参数波动大、效率低下的问题,在实际操作中改进运行方式。第一,改善蒸汽参数控制,在低负荷下使用“滑压运行+定温调节”,严格限制蒸汽温度变化速度,防止出现较大的偏差,同时适当减少锅炉产汽量使主蒸汽以及再热蒸汽的压力保持在正常范围内;第二,改善通流部分的运行维护工作,定期对叶片进行无损检测,着重查看末级叶片是否有冲刷或者开裂的现象发生,及时清除叶片上的积灰和结垢以减少流动损失;安装叶片阻尼器来阻止叶片达到其颤振临界值从而降低振动的风险;第三,改善凝汽器运行方式,“变速循环水泵+旁路调节”,随着负荷的变化改

变循环水量保证凝汽器真空度不变并且排出气体温度不超过允许值；定期对凝汽器进行冲洗去除内部灰尘及水垢提高换热能力。最后优化回热系统运行状态，合理设定高压加热器旁路开度让给水温度维持在一个合理的水平上从而节省燃料消耗并提高整个厂用电率。

### （二）强化机械部件维护，降低安全风险

对于由机械设备性能故障导致的安全隐患，要着重做好对机械装置的检修以及运行监视工作。第一是加强叶片系统的维护保养，在线监测叶片振动情况，安装叶片健康诊断系统，实时监控叶片振动幅度，一旦发现异常立即处理；定期对叶片进行打磨、防腐蚀处理，减轻冲刷损耗，提高叶片寿命。第二是精确调节胀差，严格控制蒸汽温度的变化速度，在低负荷下禁止迅速冷却，合理调整抽汽参数，保证金属温度与蒸汽温度一致，加装胀差在线监测系统，设置报警值和连锁值，做到及时报警，防止胀差过大造成动静摩擦。第三是平衡轴向推力，改善平衡盘密封结构，减小压力波动，增加轴向推力在线监测设备，实时监控推力轴承温度变化，出现温度过高就降低负荷，以防推力轴承烧毁。同时做好对转子的检修工作，定期对转子做无损探伤检查，关注转子热应力的变化趋势，防止频繁启停使转子产生疲劳损伤。

### （三）优化调节系统，提升响应精度

为了解决调节难度增大以及响应精度降低的问题，从改善调节系统及操作规程两方面着手。一方面改进调节阀控制方式，在定期检修校验的基础上清理阀体内杂物、积灰等杂质防止阀门卡涩现象发生从而提高调节阀控制精度；结合负荷变化规律优化调节阀开启曲线来减小节流损失以达到精确调节负荷的目的。另一方面强化机炉联合调控，在汽轮机负荷发生变化时及时改变锅炉燃烧情况保证锅炉产汽量稳定，避免由于锅炉参数波动而影响到汽轮机的调节效果。同时要制定详细的深度调峰操作指南并严格要求值班员按照规定执行，杜绝因误操作造成的调节故障；还要做好值班员的技术培训使其具备良好地对深度调峰工况进行分析判断的能力以及应对突发状况的能力以便能迅速响应调度中心下发的电网负荷指令。

### （四）强化辅助系统协同，消除运行隐患

为了解决辅助系统协同性降低问题，提高各个辅助系统之间的配合控制以及保养工作。一方面改善锅炉系统的运行状况，对燃烧器进行改造，增强低负荷下燃

烧稳定性，防止熄火、爆燃现象发生；采取“三冲量给水调节+手动干预”的方式来改善水位控制，防止出现“虚假水位”造成安全事故。另一方面做好润滑油系统的保养工作，定期检测润滑油的质量、温度及压力等参数变化情况，及时更换已经变质的润滑油，改进润滑油冷却系统使油温保持恒定，保证轴承油膜稳定。另一方面优化环保辅助系统的运行，使用烟气再循环技术提高脱硝催化剂入口烟气温度以达到脱硝效率要求，在线监测环保设施运行状态并对其进行定期检修维护清除积灰、堵塞等问题使得环保排放指标满足规定范围之内。同时制定辅助系统连锁监控方案，实时监控各辅助系统运行参数的变化情况，一旦发现异常立即进行联动处理从而提高联合运行水平减少安全隐患的发生概率。

### 结论

在新型电力系统中，电厂汽机深度调峰运行对于保证电网安全稳定、促进新能源消纳至关重要，在此过程中汽机运行特性与传统基荷运行有较大区别。通过对某厂实际运行情况进行研究分析可知，在进行深度调峰时汽机热力特性、机械特性、调节特性和辅助系统特性都会发生较大改变，具体为：热力参数波动增大、机械设备安全性降低、调节精度下降以及辅助系统配合不佳等现象，这给汽机深度调峰带来极大安全隐患并影响其平稳有序高效运转。采取优化热力运行方式、加强机械设备保养、改进调节装置设计及提高各辅助系统的配合程度等切实可行的方法可以明显改善汽机深度调峰性能，减少事故隐患，提高工作效率和调节水平以适应新型电力系统对调峰的要求。

### 参考文献

- [1] 孙荣富, 王歌, 闵睿, 朱天博, 刘沁哲, 王飞. 面向新型电力系统的虚拟电厂交易机制设计[J]. 电力系统自动化, 1-18.
- [2] 石少伟, 岳昊, 陈翔宇. 大力发展虚拟电厂为加快构建新型电力系统注入新动能[J]. 华北电业, 2025, (11): 58-59.
- [3] 沈昊阳. 新型电力系统中的虚拟电厂关键技术探究[J]. 科技资讯, 2025, 23(21): 103-105.
- [4] 高明, 曾平良, 冯永朝. 新型电力系统中的虚拟电厂研究综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(06): 143-154.