

火电机组灵活调峰性能及运行策略优化

郭 洋

华能甘肃能源开发有限公司八〇三分公司 甘肃嘉峪关 735100

摘要: 随着双碳战略的不断推进,风电、光伏等新能源发电装机比例不断上升,其间歇性和波动性特征也给电网安全稳定运行带来严峻地挑战。火电机组是电力系统中最重要的调控源,在保证电力供需平衡和新能源消纳方面发挥着重要作用,其灵活调峰性能直接影响新能源系统的运行效率和安全性。文章系统性分析了火电机组灵活调峰的核心内涵、性能影响因素,对现有调峰运行面临的难点,从技术改造、运行调控、调度协同、政策保障等多个层面提出有针对性的运行策略优化方案,旨在为火电机组提升灵活调峰能力、适配新型电力系统发展需求提供理论支撑与实践参考。

关键词: 火电机组; 灵活调峰; 性能提升; 运行策略

引言

随着新一代电网的发展,火电机组正由传统的基荷电源向灵活调节电源转型,其灵活调峰能力已经成为衡量机组核心竞争力和新能源消纳能力的重要指标。在这一背景下,研究影响火电机组灵活调峰能力的因素,并对其进行优化调度,对提高电网调节灵活性,促进新能源消纳,保障能源安全,促进我国双碳战略的实施,有着重大的学术和应用价值。

一、火电机组灵活性调峰的特点

(一) 技术特性对调峰能力的制约

火电机组的调峰能力受到多个技术因素的限制,其中最关键的因素包括最低负荷、爬坡速率以及机组启停次数对设备寿命的影响。传统火电机组的设计初衷并非应对频繁的负荷调节需求,而是基于稳定供电的基础电力供给。这些机组在负荷调节上表现出较大的滞后性,尤其在面对快速负荷波动时,往往难以及时调节至理想工况,造成一定的效率损失。在实际操作中,机组启动时间长、负荷调节速度慢等问题突出,严重影响了火电机组作为调峰资源的灵活性。机组的最小技术出力限制了其在低负荷情况下的运行效率,过低的负荷将导致燃料消耗增加,进而降低其经济性。

(二) 经济性挑战下的运行困境

电力市场的波动性对火电机组经济性的影响尤为显著。在现货市场中,电价受到供需关系、市场预期以及新能源发电波动的影响,导致电价呈现剧烈波动。这一变化使得火电机组面临着调峰收益的不确定性。在低负

荷时段,机组的运行成本较高,而电价较低的情况下,机组的经济效益下降。频繁的启停和负荷调整会加速机组的设备磨损,增加维修成本,进一步削弱其经济性。如何在灵活性调峰需求和经济性之间找到平衡,成为当前火电机组调峰策略优化的关键问题。

(三) 市场机制对调峰行为的引导作用

随着电力市场化改革的推进,火电机组调峰行为在很大程度上受市场价格信号的引导。电力现货市场中,价格波动较为频繁,这种波动性直接影响火电机组的运行策略。尽管调峰需求增加,但由于市场机制尚不完善,火电机组在参与调峰时往往无法获得稳定的经济激励。辅助服务市场的建设不完善使得火电机组的调峰行为缺乏有效的补偿机制,进一步削弱了其市场参与的积极性。

二、火电机组灵活调峰性能的影响因素分析

(一) 设备因素

设备性能是火电机组灵活调峰的基础,其核心设备的设计水平和工作状况将对调峰深度、速度和稳定性产生重要影响,是提高机组调峰效能的核心瓶颈。比如锅炉设备,其最低经济功率取决于其燃烧稳定性。常规锅炉以基本负荷为目标,存在低负荷调峰下炉膛温降和煤粉难以着火等问题,容易发生熄火和结焦等问题,制约了其深度调峰能力。比如,当亚临界锅炉负载低于30%时,需要添加燃油来稳定燃烧,造成调峰费用和环境压力。另外,机组的蓄热能力、受热面布置等因素也会对其负载变动率产生一定的影响。汽轮机系统方面,汽轮机的调节特性、通流效率直接影响机组的负荷调节范围与经济性。在低负荷调峰下,低压缸的送风损失明显增

大, 导致其效率急剧降低, 特别是在负载小于40%的情况下, 其调峰能力受到制约。此外在辅机系统方面, 辅助设备如给水泵、引风机、送风机、磨粉机等的调节容量和匹配程度也会直接关系到机组的调峰性能。现有的辅助设备大多采用恒速工作, 在低负荷工况下可能会出现大马拉小车的现象, 辅助设备能耗高, 调节灵活度低, 不能适应机组的宽负荷运行要求, 从而影响到机组的平稳运行。

(二) 运行因素

运行控制水平是火电机组灵活调峰能力的重要影响因素, 通过合理的运行策略、精确的参数控制和专业的操作人员, 可以最大限度地发挥机组的潜能, 提高调峰能力, 减少运行费用和安全风险。在运行策略上, 常规定压型方式很难适应灵活调峰需求, 在定压型工况下, 需要通过调节阀开度来调节负载, 具有较大的节流损耗, 在低负荷调峰下经济性较差, 并且负载波动速度较慢。滑压操作可有效解决该问题, 在低负荷下可减小主蒸汽压力, 减小节流损失, 提高机组经济性, 然而, 滑压操作对参数的控制精度有很高的要求, 若控制不当, 就会影响机组的稳定运行。在参数控制上, 主要是蒸汽压力、温度、汽包水位和负压等重要参数的调节精度, 在低负荷调峰下, 系统参数的波动灵敏度增大, 如果控制不合理, 就可能造成系统参数过大, 甚至造成设备的故障。比如, 如果锅炉的负压控制不好, 就可能会导致漏风和熄火等故障。

(三) 燃料因素

燃料的质量和匹配度也是决定火电机组灵活调峰能力的关键, 从燃料热值角度看, 在低负荷调峰下, 锅炉输入热量减少, 如果燃料热值降低, 则会引起炉内温度降低、煤粉难以着火、燃烧稳定性降低, 严重时需投油稳燃, 增大调峰费用。比如, 在燃料热值超过10%的情况下, 机组的最低技术功率将增加5-10%, 制约了其深度调峰的能力。燃料挥发分方面, 挥发份含量是决定其着火速率的重要参数, 高挥发份可以促进其快速点火, 提高其燃烧稳定性。在低负荷调峰下, 如果燃油挥发分偏低, 煤粉着火滞后, 极易发生熄火和结焦现象, 制约机组的深度调峰能力。例如, 无烟煤的挥发分较低, 在低负荷下燃烧不稳定, 机组最小技术出力通常高于烟煤机组。在燃料粒径与配比方面, 煤粉颗粒尺寸太大, 着火延迟, 燃烧不完全, 燃煤煤耗和污染物排放量增大; 粒度太小, 不仅使制粉能耗增大, 而且存在爆炸危险。在低负荷调峰下, 如果煤粉配比不当, 将造成炉内温度

不均匀、燃烧不稳定、调峰能力降低等问题, 同时, 混合燃料比例对调峰能力也有一定的影响。

三、火电机组灵活调峰运行策略优化措施

(一) 技术改造优化

锅炉系统改造, 改善锅炉低负荷稳定燃烧的问题, 可以利用浓淡燃烧和分级送风技术, 利用双流道燃烧器实现煤粉浓淡分离, 在浓相区增加局部煤粉浓度, 在淡相区减小煤粉浓度, 并结合分层通风技术, 保证不超过30%负荷时不投油稳燃。利用等离子点燃器或微量燃料点燃器取代传统的大型油枪, 使其燃料消耗量降低, 在低负荷时可减少50%以上的助燃率。通过在燃烧室内铺设超薄卫燃带, 降低炉内热损失, 保持局部高温, 保证炉心温度 $\geq 1100^{\circ}\text{C}$, 提高低负荷下的稳定燃烧。对燃烧器构型进行改进, 利用预点火的低负荷稳定燃烧器, 在预燃烧空腔内形成一种局部的高温环境, 增强煤粉的点火和燃烧, 并具有防止结渣的作用。

其次是汽轮机系统改造, 可以利用涡轮低压缸零输出/切缸技术, 通过在低压缸进汽端口安装蝶阀, 在低负荷工况下关闭蝶阀, 注入少量的冷却水来保持真空, 使机组的最低稳定负荷由30%降低到15%-20%, 大幅提高深度调峰能力; 对高、低压缸流道结构进行优化, 其中, 高压缸壁采用子午收缩式静叶, 以增加低负荷下的工作效率, 而低压缸叶则采用抗吹风设计, 以降低切缸过程中产生的热风积热。优化透平汽门调整系统, 利用数字式电液调节技术, 提高汽门的调整精度和响应能力, 提高负荷变化率, 保证机组对调度命令的迅速反应。强化转子的热应力调控, 在启动和负载调节时, 对升降速率进行优化, 降低转子的疲劳破坏, 提升启停调峰能力。

最后是辅机系统改造, 将重点放在提高辅助设备的灵活性和经济性上, 推动辅助设备的变频, 对核心辅助设备如给水泵、引风机、送风机、磨煤机等进行变频改造, 在30%的负载下, 辅助设备的功耗可以减少40%-60%, 比如给水泵的电流可以由300A降到120A; 在辅机设备上增加小容量冗余配置, 增加小流量给水泵、小功率的引风机, 低负荷时改为小型辅助设备, 以达到减少辅助设备的功率消耗。对辅助设备的控制逻辑进行优化, 达到辅助设备和主机负载协调调控的目的, 提高辅助设备的响应能力, 使其能够适应大负载运行要求。

(二) 运行控制优化

优化负荷调节, 全面推行滑压操作方式, 根据机组负载特点对滑压线进行优化, 使其在低负荷工况下进行滑压操作, 以减小节流损耗, 提高经济效益。为保证机

组的平稳输出,在高负荷下采取定压操作,达到定压-滑压组合工作的目的。比如,在30%负荷下,将主汽压降低到40%,可以明显减少节流损失。对负荷变动率进行优化,依据机组负荷等级和设备状况,设计不同的负荷变动率曲线,在高负荷时,适当增加负荷变动率,在低负荷下,减低负荷变动率,以防止参数的剧烈波动,降低设备的损耗。

然后是优化参数控制,可以引入先进控制技术,如模糊控制、模型预测控制等,以取代常规PID控制,实现主蒸汽压力、温度、汽包水位、炉膛负压等控制精度的同时,减小系统参数的变化。对燃烧控制策略进行优化,通过调整煤粉比例和风煤比,实现分层配风和分级燃烧,保证燃烧的稳定,减少燃料消耗和污染。对供水调控策略进行优化,在低负荷调峰下,利用变转速给水泵进行调速,将汽包水位的调控区间由 $\pm 100\text{mm}$ 扩展到 $\pm 150\text{mm}$,利用水位的变化来抵消一部分负载的扰动,提高水位的稳定运行。

最后是加强燃料管理与优化,构建油品质量监控系统,对油品的发热量、挥发份、灰分等指标进行实时监控,并依据油品的质量状况,及时调整燃烧方案,保证燃料的稳定燃烧。对燃油比例进行优化,采取无烟煤、劣质煤和高品质煤混合的方式,提高低负荷下的稳定燃烧性能,减少燃油费用。要优化磨煤系统的操作,按负荷要求调节磨煤机的数量和功率,控制煤粉的粒度,保证煤粉的均匀性,提高燃烧的效率。强化油品的贮存和运输管理,防止油品受潮结块,保证油品的稳定供给,保证油品的调峰。

(三) 调度协同优化

优化电网调度,根据机组的调峰能力和经济性能,构建以机组最小技术出力、负荷变动率和调峰成本为基础的调峰任务分配机制,以防止个别机组出现调峰压力超标,使单机调峰潜能得到最大限度地发挥。改进电力系统负荷预测系统,提高新能源出力和电网负荷预测的准确性,缩短预测时间,对日内的发电计划进行滚动调整,降低调度订单的频繁变动。对调峰时序进行优化,优先利用储能和需求侧响应等灵活调峰资源,并将其调至火电机组进行调峰,以减少火电机组的调峰压力和费用。通过构建跨地区电网的跨地区调峰协作机制,实现跨地区电网的调峰资源共享,提高电网的总体调峰能力。

其次是强化源网荷储协同调峰,推进火电机组和储

能的协同调峰,在电站中建设电化学储能、飞轮储能等储能设备,通过储能设备实现对负载的快速响应,以弥补火电机组负载变动速度不够快的缺陷,并减少机组频繁的负荷波动带来的损失。强化新能源与火电机组的协调,针对新能源出力变化,提前进行负荷调节,使新能源与火电相互补充,提高新能源消纳能力。充分发挥需求侧的调峰潜能,利用电价信号对用户进行错峰用电,激励高能耗企业调整生产工艺,并通过提供可中断负荷、可控制负荷等辅助服务来缓解火电机组的调峰压力。

最后是完善调峰监测与诊断体系,通过对火电机组的运行参数、设备运行状态、能耗、污染物排放等数据进行实时监控和评价,实现对机组调峰能力的动态监控和评价。利用大数据、人工智能等技术,建立调峰工况故障诊断模型,对设备故障、参数异常等问题进行实时检测,并对其进行预警,引导调度员做出正确的应对。构建调峰效能评价指标,通过对机组调峰能力、经济性和环境效益等指标的定期评估,辨识调峰效能提高的潜能,并对调峰策略进行优化。

结语

通过技术改造优化、运行控制优化、调度协同优化措施,可以有效提高火电机组灵活调峰性能,保障电力系统稳定运行。未来,随着能源结构持续优化,可再生能源占比将进一步提高,火电机组深度调峰需求也将更加迫切。需进一步深入研究控制策略,提升技术水平,以适应电力系统发展需求,推动能源行业绿色、高效、可持续发展。

参考文献;

- [1]曾银佳.浅谈火电机组适应宽负荷灵活运行及深度调峰运行技术研究[J].电力设备管理,2023(3):229-231.
- [2]张潇,贾庆岩.基于深度调峰的火电机组热工控制策略优化[J].湖北电力,2022,46(5):120-128.
- [3]蔡斌,韩义,荣俊,等.火电机组灵活性技术改造热力特性试验研究[J].电站系统工程,2024,40(06):5-7.
- [4]王春艳,张海峰,张晓东.火电机组深度调峰控制策略研究[J].热力发电,2019,48(01):94-99.
- [5]孙锐,孙绍增,李争起.火电机组灵活性改造及深度调峰技术[J].中国电机工程学报,2018,38(11):3221-3230.