

燃气轮机联合循环机组在调峰运行中的性能分析

曹锦荣

华电福新广州能源有限公司 广东 广州 511340

摘要：本文聚焦燃气轮机联合循环机组调峰运行性能。阐述其将燃气轮机与蒸汽轮机循环结合提升热效率的工作原理，分析两班制、低负荷、快速变负荷等调峰模式特点及调峰能力评估指标。探讨负荷、环境温度变化及不同调峰策略对机组性能和经济性的影响。提出热力系统优化、燃烧与排放控制、智能控制与预测性维护、储能与辅助系统协同等性能优化策略，为机组高效调峰运行提供参考。

关键词：燃气轮机；联合循环机组；调峰运行；性能分析

1 燃气轮机联合循环机组基本原理与调峰特性

1.1 联合循环机组工作原理

燃气轮机联合循环机组是高效发电系统，它巧妙融合燃气轮机循环与蒸汽轮机循环，实现能量梯级利用，大幅提升机组热效率。在燃气轮机环节，空气经压气机压缩是关键。压气机借助高速旋转叶片，大幅提高空气压力和温度。压缩后的空气进入燃烧室，与天然气等燃料充分混合燃烧，产生的高温高压燃气蕴含巨大能量，推动燃气轮机涡轮高速旋转，进而带动发电机发电，将热能转化为电能。不过，做功后的燃气余热温度仍高，若直接排放会造成能量浪费。联合循环机组的精妙之处在于充分利用这部分余热。燃气轮机排出的高温烟气进入余热锅炉，锅炉采用高效换热结构，增加烟气与水的接触面积和换热时间，使水快速加热成高温高压蒸汽。随后，蒸汽进入蒸汽轮机，推动其叶片旋转，再次带动发电机发电。通过这种双循环联合，联合循环机组的热效率相比单一循环有了质的提升，通常可达50%-60%，在先进技术与优化运行下还能更高。

1.2 调峰运行模式分类

燃气轮机联合循环机组调峰运行模式多样，各具特点与适用场景。两班制运行模式下，机组在用电低谷停机，期间完全静止、不耗燃料。其优势是能快速响应电网调峰需求，用电高峰时可迅速重启投入运行。然而，频繁启停对设备挑战巨大。启停过程中，机组内部部件热应力变化大，热应力冲击会加速设备磨损老化，缩短使用寿命。而且，启停需额外燃料加热设备至正常运行温度，燃料消耗和能量损失大，增加了发电成本^[1]。低负荷运行时，机组在低于额定负荷状态持续运行。此方式避免了频繁启停问题，对设备热应力影响较小。但长期低负荷运行会使机组热效率下降。因为在低负荷时，燃气轮机和蒸汽轮机的燃烧与做功过程无法达到最佳状

态，部分能量以热量形式散失，导致燃料消耗增加，发电效率降低。快速变负荷运行要求机组具备出色的动态响应能力，能根据电网负荷需求，在短时间内快速调整输出功率。这就需要机组迅速调整燃气轮机的进气量、燃料量以及蒸汽轮机的蒸汽参数等。该模式能更好适应电网实时负荷波动，但频繁的负荷变化对机组控制系统和设备稳定性要求更高。

1.3 机组调峰能力评估指标

评估燃气轮机联合循环机组的调峰能力，需要综合考虑多个关键指标。调峰范围是衡量机组调峰能力的重要指标之一，它指机组能够调整的输出功率范围，通常以机组额定功率的百分比表示。调峰范围越宽，说明机组适应不同负荷需求的能力越强。例如，某机组的调峰范围为30%-100%额定功率，这意味着它可以在额定功率的30%到100%之间灵活调整输出。在电网负荷波动较大的情况下，调峰范围宽的机组能够更好地满足电网的调峰要求，避免因负荷调整能力不足而影响电网的稳定运行。调峰速度也是关键指标，即机组从一种负荷状态调整到另一种负荷状态所需的时间。快速的调峰速度能够使机组及时响应电网的负荷变化，提高电网的稳定性。调峰速度一般以每分钟功率变化的百分比来衡量，如机组能够在5分钟内将输出功率从50%额定功率调整到80%额定功率，调峰速度即为6%/分钟。在实际运行中，电网负荷可能会在短时间内发生较大变化，调峰速度快的机组能够迅速调整输出，保持电网的供需平衡。调峰经济性则主要考虑机组在调峰运行过程中的燃料消耗、运行成本以及维护成本等因素。在满足调峰需求的前提下，燃料消耗越低、运行和维护成本越少，调峰经济性就越好。

2 调峰运行对燃气轮机联合循环机组性能的影响

2.1 负荷变化对性能的影响

当机组负荷发生变化时，会对机组的性能产生多方

面复杂的影响。在燃气轮机部分,负荷降低是一个显著的变化。此时,燃气轮机的进气量和燃料量会相应减少。由于进气量和燃料量的减少,燃烧室内的燃烧温度和压力也会降低。这直接导致燃气轮机的效率下降,因为燃烧过程不够充分,部分燃料能量未能有效转化为机械能。燃气轮机的排气温度也会降低,而余热锅炉产生的蒸汽参数与排气温度密切相关。排气温度降低会使余热锅炉产生的蒸汽压力和温度下降,进而影响蒸汽轮机的做功能力。在蒸汽轮机方面,由于进入蒸汽轮机的蒸汽参数降低,蒸汽的做功能力明显减弱。蒸汽轮机是依靠蒸汽的能量来推动叶片旋转做功的,蒸汽参数下降意味着蒸汽携带的能量减少,从而导致蒸汽轮机的输出功率减少。负荷变化还会引起机组内部各部件的温度和压力波动。这种波动会产生热应力,长期积累会对设备的结构强度和可靠性造成严重影响。

2.2 环境温度对性能的影响

环境温度对燃气轮机联合循环机组的性能有着显著且不可忽视的影响。在高温环境下,空气密度会明显降低。进入燃气轮机的空气质量流量减少,这是因为空气密度降低,相同体积的空气中所含的空气质量减少。空气质量流量的减少直接导致燃气轮机的功率输出下降。同时,高温会使燃气轮机的压缩过程效率降低。在压缩过程中,压缩空气所需的功增加,因为高温使得空气分子更加活跃,压缩难度增大。而且,压缩后空气的温度升高,进一步影响了燃烧过程的稳定性。高温的压缩空气可能导致燃烧室内的燃烧温度过高,增加NO_x等污染物的排放,同时也可能使燃烧过程变得不稳定,影响机组的运行效率。高温还会使余热锅炉的散热损失增加。在高温环境下,余热锅炉周围的温度较高,热量更容易散失到环境中,降低余热回收效率,从而影响整个联合循环机组的热效率^[2]。相反,在低温环境下,空气密度增大。燃气轮机的进气质量流量增加,这有利于提高燃气轮机的功率输出。更多的空气进入燃烧室,能够与燃料更充分地混合燃烧,产生更多的能量。但低温也可能导致一些设备出现冻结等问题,影响机组的正常运行。

2.3 调峰策略对机组经济性的影响

不同的调峰策略会对机组的经济性产生截然不同的影响。两班制运行虽然能够快速响应调峰需求,但频繁的启停会导致燃料消耗大幅增加。在启动过程中,需要消耗大量的燃料来加热机组设备,使其达到正常运行温度。这部分额外的燃料消耗在调峰运行中占据了相当大的比例,会显著降低机组的经济性。启停过程中的设备磨损和老化也会增加维护成本。频繁的启停会使机组的

各个部件承受更大的应力,加速部件的损坏,需要更频繁地进行维修和更换,增加了维护费用。低负荷运行虽然避免了频繁启停带来的问题,但由于机组在低负荷时热效率下降,燃料消耗相对较高。在低负荷状态下,燃气轮机和蒸汽轮机的运行效率都较低,部分能量以热量的形式散失,导致发电成本增加。而且,长期低负荷运行可能导致设备性能下降,进一步增加后续的维修和更换成本。快速变负荷运行要求机组具备更先进的控制系统和更精确的调节能力,这会增加设备的投资成本。先进的控制系统和精确的调节设备需要更高的研发和制造成本。

3 燃气轮机联合循环机组调峰运行的性能优化策略

3.1 热力系统优化

对热力系统进行优化是提高机组调峰性能的关键举措。改进余热锅炉的设计是优化热力系统的重要方向。可以采用更高效的换热管束,这些换热管束具有更大的换热面积和更好的换热性能,能够更有效地吸收烟气中的热量。同时合理设计烟气流程,使烟气在余热锅炉内能够充分与水进行热交换,增加烟气与水的换热面积和换热时间。通过这些措施,可以使更多的余热被回收利用,提高余热回收效率。余热回收效率的提高意味着更多的热量被转化为蒸汽的能量,从而提高蒸汽轮机的输出功率和整个联合循环机组的热效率。优化蒸汽轮机的通流部分设计也是至关重要的。采用先进的叶片设计和制造工艺,可以减少蒸汽在通流过程中的能量损失。例如,改进叶片的形状和表面粗糙度,使蒸汽在通过叶片时能够更顺畅地流动,减少摩擦损失和涡流损失。这样可以使蒸汽轮机在不同负荷下都能保持良好的做功能力,提高机组的整体性能。另外,合理调整热力系统的运行参数,如蒸汽压力、温度等,根据不同的负荷工况进行优化匹配。在不同的负荷下,通过调整蒸汽参数,使机组能够在最佳状态下运行,进一步提高机组的效率和性能。

3.2 燃烧与排放控制

在燃烧控制方面,采用先进的燃烧技术和燃烧器设计是确保机组高效稳定运行的关键。干式低NO_x燃烧技术是一种先进的燃烧技术,通过优化燃烧室的空气和燃料混合比例、燃烧温度和压力等参数,可以有效降低NO_x的排放。在燃烧过程中,精确控制空气和燃料的混合比例,使燃烧更加充分,减少NO_x的生成。同时合理调整燃烧温度和压力,避免燃烧温度过高导致NO_x大量产生。安装精确的燃料计量和控制系统,根据负荷变化实时调整燃料供应量^[3]。当负荷变化时,燃料计量和控制

系统能够迅速做出反应,精确控制燃料的供应量,保证燃烧过程的稳定性和经济性。这样可以确保在不同负荷下都能实现稳定、高效的燃烧,提高机组的运行效率和环保性能。在排放控制方面,除了控制NO_x排放外,还要关注CO、未燃碳氢化合物等其他污染物的排放。这些污染物同样会对环境造成污染,需要采取有效的措施进行控制。采用高效的尾气处理装置,如选择性催化还原(SCR)系统、氧化催化剂等,对燃气轮机排出的尾气进行进一步处理。SCR系统可以将NO_x转化为氮气和水,氧化催化剂可以将CO和未燃碳氢化合物氧化为二氧化碳和水,从而降低污染物的排放浓度,满足日益严格的环保要求。

3.3 智能控制与预测性维护

引入智能控制系统是提升机组调峰性能和运行效率的重要手段。利用先进的传感器和数据分析技术,可以实时监测机组的运行状态和各项参数。传感器能够精确地采集机组的温度、压力、转速等各种参数,并将这些数据传输到智能控制系统中。通过建立机组的数学模型和智能算法,智能控制系统可以对机组的运行进行优化控制。同时开展预测性维护对于提高机组的可靠性和可用性至关重要。通过对机组运行数据的长期监测和分析,利用机器学习算法可以预测设备可能出现的故障和性能下降趋势。机器学习算法可以对大量的运行数据进行学习和分析,找出设备运行的规律和潜在的问题。一旦发现设备可能出现故障或性能下降,就可以提前安排维护计划,进行有针对性的检修和维护。这样可以避免设备突发故障导致的停机损失,减少维修时间和成本,提高机组的可靠性和可用性,保障机组的长期稳定运行。

3.4 储能与辅助系统协同

储能系统与燃气轮机联合循环机组的协同运行是提高机组调峰能力的有效途径。在用电低谷时段,机组多余的电能可以储存到储能系统中。储能系统就像一个“能量仓库”,能够将多余的电能储存起来,避免能量的浪费。在用电高峰时段,储能系统释放电能,补充机

组的输出功率。当电网负荷突然增加时,储能系统可以迅速释放电能,减少机组的负荷波动,提高机组的运行稳定性和经济性。常见的储能技术包括电池储能、抽水蓄能等^[4]。电池储能具有响应速度快、灵活性高的特点,能够快速地完成充放电;抽水蓄能则具有储能容量大、运行成本低的优点。另外,优化辅助系统的运行也能显著提高机组的性能。例如,优化冷却水系统的运行,根据环境温度和机组负荷调整冷却水的流量和温度。在高温环境下,增加冷却水的流量和降低冷却水的温度,可以更有效地带走机组产生的热量,降低机组的温度,提高机组的运行效率。加强空气进气系统的维护和管理,保证进入燃气轮机的空气清洁、干燥。定期清理进气过滤器,防止灰尘和杂质进入燃烧室,提高燃烧效率,减少设备的磨损,从而提升机组的整体性能。

结束语

燃气轮机联合循环机组在调峰运行中面临诸多挑战,负荷、环境温度等因素影响其性能与经济性,不同调峰策略各有利弊。但通过热力系统优化、改进燃烧与排放控制、引入智能控制与预测性维护以及储能与辅助系统协同等策略,可有效提升机组调峰性能,提高运行效率与经济性,增强机组适应电网负荷波动的能力,保障电力系统的稳定可靠运行,推动能源的高效利用。

参考文献

- [1]王一丰,翟春华,黄庆,牛晨晖,苏新民,焦道顺,潘赫男,王乾远,孙魏,肖俊峰,胡孟起,夏林,李军.大功率燃气轮机联合循环机组三压再热余热锅炉建模及变负荷运行规律研究[J].热力发电,2023,52(12):79-89.
- [2]郝震震,王海涛,冯磊.H级联合循环汽轮机深度调峰技术研究[J].热力透平,2023,52(01):25-28+33.
- [3]马明锐.燃气轮机—蒸汽机联合循环发电机组调差系数优化整定分析与处理[J].科技风,2021,(36):192-195.
- [4]于涛.燃气轮机及其联合循环与新能源电网调峰[J].2021(10):342-342.