

重型燃气轮机进气冷却改造提升机组运行效率研究

张耀

华电章丘发电有限公司 山东 济南 250200

摘要: 本文研究进气冷却改造对提升重型燃气轮机运行效率的影响。分析环境温度对燃气轮机效率的制约作用,阐述进气冷却技术的原理与优势,剖析其环境与经济效益。探讨不同冷却系统设计方案、冷却介质选择对效率的影响,综合评估改造效益。通过数值模拟预测改造效果,攻克关键技术难题,开展改造后性能测试评估,证实该改造可显著提升机组燃烧效率与输出功率。

关键词: 燃气轮机; 进气冷却; 运行效率; 数值模拟

引言

燃气轮机热力循环效率受进气温度影响显著,高温环境会导致空气密度下降、压缩比降低,引发燃烧效率衰减与输出功率损失^[1]。进气冷却技术通过热力学参数调控,可有效改善燃气轮机工质状态,其核心原理在于利用冷却介质降低进气温度,提升空气质量流量,从而优化燃烧过程热力学特性^[2]。现有研究表明,进气冷却改造可使燃气轮机输出功率提升5%~15%,热效率提高1%~3个百分点^[3]。在能源转型与大力推进碳减排的大环境下,进气冷却技术已然成为助力重型燃气轮机实现增效降耗目标的关键技术方法,其技术经济性与环境适应性方面的情况,迫切需要通过系统性研究来加以验证。

1 重型燃气轮机进气冷却改造的必要性

1.1 环境温度对燃气轮机效率的制约

环境温度影响燃气轮机运行效率的重要因素,每一次温度的变化都牵动着进气温度与空气密度之间的微妙动态平衡。当处于高温工况时,燃气轮机的进气温度会出现显著上升的情况,按照理想气体状态方程来看,空气密度会降低,进而使得进入燃烧室的空气质量流量变少。这一变化使得燃烧过程难以充分进行,燃烧效率随之降低,最终对燃气轮机的输出功率和热效率产生了不利影响^[4]。当进气温度出现每10℃的升高时,燃气轮机的输出功率或许会降低大约1%到3%,这充分显示出环境温度对燃气轮机效率有着明显的制约效果。由此,对进气进行冷却改造便成了一条能够有效缓解高温环境给燃气轮机性能带来负面影响的途径。

1.2 进气冷却技术原理及优势阐述

进气冷却技术依托热力学原理降低进气温度、提升空气密度,对燃烧过程进行优化,完成燃气轮机性能提升的目标。该技术运用水、空气等冷却介质吸收进气里的热量,将进气温度降到设计工况下提升空气密度,让

进入燃烧室的空气质量流量得以增加。这一过程使燃烧效率得到显著提升,通过增大燃料和空气的混合比例,让燃烧强度得以增强,进而让燃气轮机的输出功率与热效率都更上一层楼。进气冷却技术展现出独特优势直接作用于燃气轮机的进气系统,不用对核心部件开展大规模改造,有效降低技术风险与改造成本。

1.3 改造带来的环境与经济效益分析

进气冷却改造不仅让燃气轮机的运行效率得到提升,还带来了十分显著的环境与经济效益。站在环境效益的视角,进气冷却技术凭借降低燃烧温度技术,成功减少了氮氧化物(NOx)等污染物的产生,对改善空气质量颇有帮助,也能满足愈发严格的环保标准。进气冷却改造凭借提升燃气轮机的输出功率以及热效率,直接使发电量得以增加,能源利用效率也得到提高。这项技术还借助延长设备的使用寿命、削减维护成本等途径,让燃气轮机在整个生命周期里获得了更可观的经济效益。以某大型燃气轮机电厂为例,在实施进气冷却改造之后,机组输出功率有了大约5%的提升,年发电量增加了约2000万千瓦时,与此同时,燃料消耗降低了约3%,一年下来能节约燃料成本数百万元。经过改造,设备的故障发生率明显降低,日常维护的花费也随之减少,这为电厂赢得了颇为可观的经济回报。

2 重型燃气轮机进气冷却改造的策略

2.1 冷却系统设计与优化方案

冷却系统设计在重型燃气轮机进气冷却改造中占据核心地位,其方案选取对改造成效有着直接影响。直接蒸发式冷却系统,它借助喷淋水雾与空气直接接触,依靠水的蒸发吸热作用来降低进气温度,有着结构简便、冷却效率颇高的特性,不过得考虑水质对设备产生的腐蚀以及水雾携带方面的问题。间接蒸发式冷却系统借助热交换器,让空气与水以非直接接触的方式完成换热过程,避开

水质带来的影响,不过,该系统的复杂程度以及初期投入资金相对多一些。进行优化设计时,要全面考量环境温度、湿度状况以及燃气轮机的运行特性,借助热力学分析来选定最佳冷却方式。当燃气轮机所承载的负荷出现变化时,进气温度必须迅速做出调整,以此确保燃烧过程能够保持稳定状态。冷却系统要配备智能控制模块,该模块能实时监测进气温度、湿度以及燃气轮机功率输出情况,进而动态调节冷却介质流量或者喷淋强度。

2.2 冷却介质选择与应用策略

冷却介质的选择对进气冷却效果以及系统运行成本产生影响。水是传统的冷却介质,凭借其较大的比热容以及高效的换热性能,在直接蒸发式和间接蒸发式冷却系统中得到了极为广泛的应用。水质硬度、微生物含量以及具有腐蚀性的离子,这些因素都有可能给冷却设备带来损害,通过软化、杀菌等技术预处理,定期维护降低风险。采用空气作为冷却介质的情境下,一般被应用于闭式循环冷却系统之中,借助空气-空气热交换器来达到进气冷却的目的。此外,混合冷却介质策略,像水与空气复合冷却这种方式,能够把两者的优势融合起来,借助分级冷却的手段来提高系统的运行效率。利用空气冷却手段,把进气温度降低到接近环境湿球温度的程度,通过水蒸发冷却的方式进一步降低温度,减少水资源的消耗确保冷却效果。

2.3 改造经济性综合评估

全生命周期成本视角下对进气冷却改造进行经济性评估时,全面考量初期投资、运行维护费用以及节能收益这几大方面。在项目的初始阶段,投资主要涵盖冷却设备的采购、安装调试以及系统集成等各项费用,其中,高效换热器、智能控制模块还有冗余设计构成了主要的成本部分。在系统的运行维护过程中,费用主要涵盖冷却介质的消耗、设备运行产生的能耗(像水泵、风机这类设备)以及定期检修所产生的各项费用。以直接蒸发式冷却系统为例,它需要不断补充因蒸发而损失掉的水量;再看看间接蒸发式系统,需要定期对换热器进行清洗,以此维持其换热效率。燃气轮机输出功率得到提升,燃料消耗也有所降低。

2.4 改造环境影响深度评估

对进气冷却改造所带来的环境影响,需从温室气体减排、降低噪音污染以及合理利用水资源这三个方面展开综合评估。在温室气体减排这一方面,对燃气轮机进行改造,能够提升其效率,进而减少燃料消耗,最终直接达成降低二氧化碳排放的效果。以某F级燃气轮机为例,当进气温度下降 10°C 时,热效率能够提升1%至1.5%,减

少排放的二氧化碳量会超过万吨。降低噪音污染成为此次改造带来的另一项重要环境效益。冷却系统在运行过程中,像风机、水泵这类设备可能会产生噪音,得通过优化设备选型以及做好隔音设计来加以控制。以低噪音风机搭配弹性减震支架,能有效将噪音水平降低5-10分贝,使其达到工业区噪音排放标准要求。在水资源利用这一环节,直接蒸发式冷却系统会消耗数量庞大的水资源,借助循环利用以及废水处理的方式来降低其对环境造成的影响。以闭式循环冷却塔为例,水循环利用率超过95%,再搭配反渗透技术对排污水进行处理,大幅减少新鲜水的取用量。间接蒸发式冷却系统由于不存在水蒸发造成的损失,所以水资源消耗相对更低,在缺水地区更为适用。

3 重型燃气轮机进气冷却改造的实施与效果评估

3.1 数值模拟在改造中的关键作用

数值模拟技术是燃气轮机进气冷却改造领域里的重要技术,凭借构建出精准的流体力学模型,对改造后燃气轮机的性能变化做出预测。该技术以Navier-Stokes方程和湍流模型为基石,融入燃气轮机实际运行参数,对不同进气温度条件下的燃烧过程及流场分布展开模拟。数值模拟技术的运用,能对进气冷却给燃气轮机输出功率、热效率以及排放特性带来的影响进行量化分析,进而为改造方案的优化提供理论支撑。例如,利用CFD(计算流体力学)软件模拟直接蒸发式冷却系统对进气温度的降低效果,可精确评估其对燃烧效率的提升作用,指导冷却系统设计参数的优化。对比直接蒸发式和间接蒸发式等不同冷却系统设计,在模拟后得到的结果筛选出最优方案,降低实际改造时的试错成本。以模拟结果作为参考,间接蒸发式冷却系统在高温环境里,能更有效地降低进气温度,对燃气轮机内部流场的干扰也相对较小,所以它能够成为优先改造的方案。此外,数值模拟技术还能够与经济性分析相结合,评估各种改造方案在成本与收益方面的比例关系,为决策过程提供坚实可靠的科学依据。将数值模拟和实验验证结合,能大幅提升进气冷却改造的精准程度以及实际可行性。

3.2 改造实施中的关键技术难题

在进气冷却改造过程中,冷却系统集成面临的核心挑战,在于要妥善解决冷却设备与燃气轮机本体之间的空间布局、管道连接以及热应力匹配等一系列问题。以直接蒸发式冷却系统为例,要在燃气轮机进气管道里装上喷嘴阵列,喷嘴阵列的布局得同时考虑冷却效果和流场均匀性,防止出现局部过冷或者冷却不够的情况。此外,冷却介质,像水这样的物质,其供应与回收的系统

必须和燃气轮机原本就有的系统实现无缝对接，以此保障运行能够稳定。对于控制系统，其优化工作的核心在于解决好冷却系统与燃气轮机主控制系统之间的协同运作问题。采取以下解决办法解决上述提到的技术难题：在冷却系统集成环节，运用模块化设计理念，把冷却设备分割成一个个独立模块，这样更便于安装与后期维护；借助有限元分析(FEA)技术来评估冷却系统给燃气轮机结构带来的热应力影响，进而对管道布局和支撑结构进行优化。针对控制系统优化，采取引入智能化控制策略的方式，借助机器学习算法，对进气温度以及冷却介质流量展开动态预测与调节工作，以此提升控制精度与响应速度。此外，还可通过实验测试验证控制系统的稳定性，确保改造后燃气轮机在各种工况下均能稳定运行。

3.3 改造后性能测试与全面评估

改造后的性能测试是验证进气冷却改造成果的重要环节。改造后的性能测试涉及的内容包含输出功率、热效率以及排放水平这些核心指标，分别在标准工况和实际运行工况下开展测试。对燃气轮机输出功率的测试，需先测量其轴端扭矩与转速，进而算出实际输出功率，再与改造前的数据作对比，以此评估进气冷却对功率提升所产生的效果。热效率测试以热力学第一定律作为理论基础，测量燃料消耗量以及输出功率，进而算出改造后燃气轮机的热效率，以此验证进气冷却能否提升燃烧效率。排放水平测试主要聚焦于对NO_x、CO以及未燃碳氢化合物这类污染物的排放浓度进行严密监测，以此评估进气冷却给排放特性带来的改善成效。改造后，燃气轮机输出功率有了5%的提升，热效率也提高了2%，同时NO_x排放浓

度还降低了30%，这样的改造效果可谓十分显著。此外，还要把改造初期的投资以及运行成本纳入考量范围，通过计算得出节能效益与投资回收期，以此评估改造是否具有经济性。

结论

进气冷却技术是重型燃气轮机热力循环优化的关键手段。该技术通过降低进气温度、提升空气质量流量，改善燃烧过程热力学特性，实现输出功率与热效率同步提升，还能降低燃料消耗率及污染物排放量，兼具技术、经济与环境效益。实施改造时，需重点攻克冷却系统集成、控制系统优化等关键技术难题，依托精准调控热力学参数与智能化控制策略保障方案可行。未来研究应聚焦冷却系统多目标优化，结合实际工况开展技术经济性分析，推动技术在能源行业绿色转型中规模化应用。

参考文献

- [1] 何欣欣,薛志恒,邹东,等.分布式联合循环机组燃气轮机进气冷却系统性能分析研究[J].汽轮机技术,2023(1):46-50.
- [2] 杨允平.进气冷却对LM6000PF燃气轮机夏季运行负荷的提升[J].燃气轮机技术,2023(1):69-72.
- [3] 叶志平.进气冷却技术提高燃气轮机的出力和热效率[J].科技与创新,2022(10):39-41.
- [4] 卢辉,解育才,杨智,等.三菱F级燃气轮机透平冷却空气冷却水系统控制改造[J].热力发电,2021(10):135-141.
- [5] 冯珍珍,田晓晶,李洋,等.某重型燃气轮机燃烧室冲击冷却特性研究[J].汽轮机技术,2020(4):275-278.