

火力发电厂汽轮机节能改造技术的应用与实践

李 祯 张军飞 唐海军

摘要:“双碳”目标不断推进,能源结构转型日益加快的时候,火力发电厂作为能源供应的重要支柱,又承受着能耗管控和环保减排的压力。汽轮机是火电厂能量转换的核心设备,汽轮机运行效率的好坏直接影响到电厂的能耗水平和经济效益,因此开展汽轮机节能改造成为火电厂降本增效、实现绿色发展的主要途径。本文根据火电厂汽轮机运行的实际,对汽轮机节能改造的概述、核心意义进行系统论述,重点分析节能改造技术的应用策略,结合实践经验总结改造要点和成效,最后对改造工作推广和优化提出建议。为火力发电厂高质量可持续发展提供技术支持,也给同类型机组节能改造提供参考借鉴。

关键词:火力发电厂;汽轮机节能改造技术;应用与实践

目前全球能源短缺问题越来越严重,低碳环保已经成为各行各业发展的必然趋势,我国也提出“碳达峰、碳中和”的战略目标,对火力发电厂的节能降耗要求越来越高。火力发电是我国电力供应的主要方式,其能耗占社会总能耗的比重较大,汽轮机是火电厂的“心脏”,是将蒸汽热能转化为机械能并发电的主要设备,运行中存在漏汽损失、通流效率低、辅机能耗高等问题,造成大量的能源浪费,制约了火电厂节能水平的提高。由于电力行业竞争日益激烈、环保政策不断加严,传统的火电厂要克服能耗瓶颈就需要依靠技术改造。基于此,本文以火力发电厂汽轮机节能改造技术的应用与实践为研究对象,主要对汽轮机节能改造的主要要点及实施路径进行分析,以期给火电厂降低能耗、提高竞争力、实现绿色转型提供实践指导和理论参考。

一、火力发电厂汽轮机节能改造概述

(一) 汽轮机核心工作原理

汽轮机是以蒸汽为工质,把蒸汽的热能转化为机械能的一种旋转式动力机械,其主要工作原理是热力学第二定律。火电厂中,锅炉产生的高温高压蒸汽经过主汽阀、调节汽阀进入汽轮机,依次流过各级静叶片(喷嘴)和动叶片,蒸汽在静叶片中膨胀加速,把热能变成动能,高速气流冲击动叶片带动转子旋转,从而驱动发电机发电,完成热能向电能的转化。汽轮机的运行效率主要受蒸汽参数、通流部件性能、密封情况和辅机协同工作状况的影响,任何一个环节出现损耗都会造成整体能耗增加,这也是节能改造的主要切入点^[1]。

(二) 汽轮机运行现状及能耗痛点

目前我国火电厂中,部分汽轮机由于投运时间较长、技术水平不高、维护不到位等原因,存在许多能耗痛点。通流效率低,部分机组通流部件长期运行后会出现磨损、结垢、腐蚀等问题,造成蒸汽流动阻力增大,能量损耗增大;密封性能变差,轴端汽封、隔板汽封等密封件磨损之后出现间隙过大,造成高压蒸汽泄漏,降低蒸汽做功效率;辅机能耗偏高,给水泵、循环水泵、真空泵等辅机多为定速运行,不能根据机组负荷的变化动态调整,存在大量节流损失;运行参数偏离设计值,主蒸汽温度、压力、凝汽器真空度等关键参数波动大,汽轮机热效率不能充分发挥出来,能耗增加。

(三) 汽轮机节能改造的核心内涵

汽轮机节能改造是在机组运行状况的基础上,依靠先进技术及实践经验,对汽轮机本体、辅机系统、控制系统及配套设施等进行优化升级、技术革新或者设备更换的系统工程。其主要思想不是简单的设备更换,而是对机组运行中能耗问题的有针对性的改造,从而达到“降损耗、提效率、减排放”的目的。改造工作要遵循因地制宜、科学合理、经济可行的原则,根据不同的机组型号、投运年限、能耗水平及电厂实际需要来制定个性化的改造方案,保证改造效果和经济效益、环保效益的统一^[2]。

(四) 汽轮机节能改造的发展趋势

在科技飞速发展的今天以及节能政策日趋严格的背景下,汽轮机的节能改造种类越来越多、智能化程度越来越高,效率也更高。第一,改造技术高效化升级,新

型密封技术、全三维通流改造技术、余热回收利用技术等先进技术的应用越来越普遍,改造效率不断提高;第二,改造模式智能化转型,借助大数据、物联网、人工智能等数字技术,创建汽轮机性能实时监测和智能调控系统,达成运行参数精确优化和故障提前预警;第三,改造范围系统化扩大,由单一的本体改造延伸至辅机系统、控制系统、热力系统的协同改造,达成全流程能量优化;第四,改造目标低碳化聚焦,结合环保要求,在节能的同时减少污染物排放,助力火电厂实现“节能与环保双赢”。

二、火力发电厂汽轮机节能改造的核心意义

(一) 降低电厂运营成本,提升经济效益

经济效益是火电厂开展汽轮机节能改造的主要动力。汽轮机能耗占火电厂总能耗的60%以上,节能改造可以降低机组煤耗、电耗,减少能源消耗成本。凝汽器真空度每提高1kPa,机组热效率可提高1%~1.5%,该电厂做真空治理专项改造,年节煤量超1.2万吨,给水泵、循环水泵等辅机变频改造后综合节电率可达20%以上。节能改造可减少设备磨损、减少故障出现,降低维修费用和非计划停机损失,提高设备使用寿命。改造后的机组发电效率提高,可以在相同的耗能下增加发电量,进一步提高电厂的盈利水平,给电厂的可持续发展提供经济上的保证。

(二) 践行低碳环保政策,减少污染物排放

在“双碳”目标和环保政策的双重约束下,火电厂作为污染物排放的重点企业,迫切需要通过节能改造来降低碳排放和污染物排放。汽轮机节能改造可提高能量转换效率,降低煤炭消耗,进而减少二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等污染物排放总量。1000MW的超超临界发电机组节能改造以后一年减少的CO₂排放量约为18万吨,相当于植树造林1000公顷。同时改造过程中可以同步优化热力系统,减少废水、废渣产生,改善电厂周边环境,助力火电厂达到环保排放标准,践行绿色发展理念,提升企业环保形象^[1]。

(三) 提升机组运行稳定性,保障电力供应安全

汽轮机稳定运行是火电厂安全供电的保证。由于部分老旧机组设备老化、技术落后,在运行中容易出现故障,造成非计划停机,影响电力供应的稳定性、可靠性。节能改造可以更换老旧、损坏的设备部件,改善控制系统,提高机组运行稳定性、可靠性。通流改造、调整汽封间隙可减小设备振动、磨损;智能控制系统改造可达到对运行参数的精确调节,防止参数波动造成设备故障。

改造之后,机组非计划停机次数减少、运行安全性提高,可以更好地应对电网负荷波动、保证电力供应的安全,为经济社会的稳定发展提供可靠的电力保障。

(四) 推动电力行业转型,助力能源结构优化

火力发电厂是电力行业的重要组成部分,节能改造既关系到自身的发展,又对整个电力行业的转型和能源结构调整起到重要的作用。目前我国能源结构正由“以煤为主”向“清洁低碳、安全高效”转变,火力发电厂要通过节能改造来降低能耗、提高清洁发电水平,与新能源发电形成协同互补。汽轮机节能改造可以促进火电厂技术水平的提高,有利于先进节能技术的推广和应用,带动整个电力行业的节能水平的提高。同时改造后的火电厂能耗低、排放少,可以更好地适应能源结构转型的要求,实现与新能源发电的协调发展,有助于我国建设清洁低碳、安全高效的能源体系。

三、火力发电厂汽轮机节能改造技术的应用策略

(一) 汽轮机本体节能改造技术应用

汽轮机本体节能改造主要集中在通流部分和密封系统上,这两个部分是蒸汽能量转换效率的决定性因素,是本体改造的重点。通流部分做全三维气动设计优化叶片型线,按照机组实际运行参数,对喷嘴、动叶片进出口角度、曲面弧度做精准优化,减少气流分离、涡流、冲击损失,相比传统叶片设计,优化后级效率提高2%到3%。另外,定期进行高压水射流清洗或者化学除垢,清除通流部件表面的结垢、积灰、腐蚀物等,使通流面积恢复到设计的精度;对运行过程中产生的隔板偏移、汽封磨损问题,采用精确调整技术调整隔板间隙;更换耐磨耐高温的汽封片,严格控制汽封间隙在设计范围内,保证通流效果稳定。密封系统改造时,把传统的梳齿汽封换成密封性能更好的蜂窝汽封或者布莱登汽封,蜂窝汽封利用蜂窝结构的节流效应,可以减少30%到50%的级间漏汽量,布莱登汽封依靠弹性结构实现动态密封,适应机组启停时的热胀冷缩,减少密封磨损。另外轴端汽封要采用柔性改造,加装弹簧加载装置以动态贴合汽封片与转子,同时安装在线泄漏监测系统实时采集密封间隙、蒸汽泄漏量等数据,及时预警泄漏隐患,从核心部件入手全方位降低能量损耗,显著提高本体运行效率,某300MW机组经过本体改造后汽轮机热耗率降低约80kJ/(kW·h),节能效果十分明显。

(二) 汽轮机辅机系统节能改造技术应用

辅机系统节能改造潜力大,耗能占火电厂厂用电的

40%以上,重点改善泵类、风机和凝汽器等主要辅机,依靠技术升级使辅机耗能与机组负荷协调。给水泵、循环水泵等核心泵组加装高压变频器,采用矢量控制技术,使泵组转速和机组负荷联动调节,当机组负荷降到50%的时候,给水泵功耗可降低60%以上,避免定速运行造成的节流损失;将传统的凝结水泵的异步电机改为永磁同步电机,并配套变频控制系统,永磁同步电机具有高效节能、功率因数高、运行稳定等特点,改造后凝结水泵节能率可达10%~15%,同时降低电机噪音和振动。在风机系统改造时,更换轴封风机、真空泵为高效节能型电机,电机效率从传统的88%提高到95%以上,在风机进口加装导流器,改善气流流动路径,削减气流扰动损失,提升风机运行效率8%~10%。凝汽器是汽轮机排汽冷却的主要设备,凝汽器运行的好坏直接影响到机组真空度,改造时用高压水射流加化学清洗的方法,去除凝汽器铜管内的结垢和生物黏泥,恢复铜管换热效果^[4]。

(三) 汽轮机控制系统节能改造技术应用

控制系统优化升级可以实现汽轮机运行参数的精准控制,保证机组一直处在最佳的运行工况之下,降低由于人为调节产生的能耗损失。一是采用自适应PID调节算法,对主蒸汽温度、压力进行精确控制,将波动范围分别控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.5\text{MPa}$ 以内,避免参数偏离设计值造成效率降低。二是优化变负荷运行策略,根据电网负荷需求制定滑压运行曲线,负荷变动时通过改变蒸汽压力而不是调门开度来控制功率,减少节流损失,低负荷工况下效率可提高1.5%到2%。三是创建智能监测与预警系统,把DCS系统数据整合起来,及时算出汽轮机热耗率、内效率这些关键指标,对真空度异常、汽温偏离等问题发出智能警报,提前找到隐患。四是从数字孪生角度出发,创建汽轮机虚拟模型,模拟不同的工况运行情况,为改造方案和运行参数提供科学依据^[5]。

(四) 余热回收与热力系统协同节能改造技术应用

经过余热回收和热力系统共同改造之后,能量梯级利用可以得以实现,进而减少能源浪费。余热回收方面,在凝汽器出口加装低品位余热回收装置,利用热泵技术将循环水余热提升到可用的温度,用于厂区供暖或者除

氧器加热,减少抽汽量;对汽轮机轴封漏汽进行回收,通过管道引入除氧器或者加热器,避免直接排放造成的热能浪费。在热力系统协同改造方面,优化回热系统,调整高、低压加热器的端差,使疏水温度与被加热水温度的差值控制在 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 之内,提高换热效率;协同优化锅炉和汽轮机的运行,使主蒸汽温度、压力稳定在设计值附近,减少汽温汽压的波动,为汽轮机创造良好的入口条件;对于热电联产机组,优化抽汽调节阀的开度和凝汽器背压的联动控制策略,在保证供热质量的前提下,最大限度地提高汽轮机的做功能力。

结束语

综上所述,火力发电厂汽轮机节能改造,属于落实双碳战略、削减经营开支、加强核心竞争力的重要工作,同时也是火电厂达成绿色高质量发展的必经之路。本文通过对汽轮机节能改造的概述、意义和应用策略的系统研究,确定本体改造、辅机改造、控制系统改造及余热回收利用为节能改造的主要途径,根据实践经验可以得出,科学合理的改造方案可以有效提高汽轮机的运行效率、减少能源损耗,实现经济效益、环保效益和社会效益的统一。目前,汽轮机节能改造技术向着高效化、智能化、系统化方向发展,未来火电厂要根据自身的实际,因地制宜的制定出改造方案,加强技术创新与成果转化,不断改进改造工艺及运维管理模式。

参考文献

- [1]王冬梁.火力发电厂集控运行节能降耗技术措施研究[J].仪器仪表用户,2025,32(12):121-123.
- [2]王小龙.火力发电厂设备运行中的故障及解决措施研究[J].仪器仪表用户,2025,32(12):86-88.
- [3]张余辉.火力发电厂生产现状及降耗优化措施分析[J].中国设备工程,2025,(23):89-91.
- [4]杨换凌.火力发电厂汽轮机设备常见故障及检修措施[J].价值工程,2025,44(35):146-148.
- [5]杨博文.发电厂锅炉和汽轮机组的协调控制系统分析[J].仪器仪表用户,2025,32(11):145-147+150.