

电厂汽轮机真空改造技术应用与效果

代志军

大唐国际发电股份有限公司陡河热电分公司, 中国·河北 唐山 063000

摘要: 发电厂维持高效率运行的核心是设备的稳定运行和效率的优化, 对关键设备进行精细化性能调整, 以科学手段优化操作参数, 是提高整体运行水平的重要途径, 汽轮机是发电系统的核心设备, 其结构复杂, 其真空系统性能的好坏直接关系到机组的稳定和经济运行。基于此, 文章分析了电厂汽轮机真空改造技术应用与效果。

关键词: 电厂; 汽轮机; 真空改造; 改造技术

Application and Effects of Vacuum Retrofit Technology for Power Plant Turbines

Dai Zhijun

Datang International Power Generation Co., Ltd. Douhe Thermal Power Branch, China Hebei Tangshan 063000

Abstract: The core to maintaining high efficiency in power plants is the stable operation of equipment and optimisation of efficiency. Conducting precise performance adjustments on key equipment and optimising operational parameters through scientific methods are important ways to improve overall operational levels. The steam turbine is the core equipment of the power generation system; it has a complex structure, and the performance of its vacuum system directly affects the stability and economic operation of the unit. Based on this, the article analyses the application and effects of vacuum retrofit technology for power plant steam turbines.

Keywords: Power plant; Steam turbine; Vacuum renovation; Renovation technology

0 引言

随着全球能源转型和环境保护的日益严格, 在役汽轮发电机组实现低真空化改造是提高能源利用率, 实现绿色低碳发展的重要途径, 该技术的推广应用符合节能减排的国际潮流, 同时也为传统电力产业注入新的动力。传统汽轮机真空系统设计多以维持高真空、提高热效率为目标, 但受工况波动和环境约束影响, 实际性能仍有提升空间, 在保证机组安全性的同时, 适当降低运行真空, 扩大蒸汽膨胀做功压差区间, 有效提高机组热效率和发电功率。同时, 优化后的真空系统可使部分未完全冷凝的蒸汽进入供热管网, 形成热电联产模式, 这一举措不仅可以满足城市供暖和工业用热多样化需求, 还可以将乏汽排出的余热转化为有效能源, 大幅提高能源综合利用效率。本项目提出的“源-热协同”模式, 可为实现循环经济和低碳发展提供技术支持, 也是传统火电向综合能源服务商转型的关键技术突破^[1]。

1 项目背景

未来热电联产机组运行存在明显的季节性背压差异, 冬季常规背压维持在 3.3~5.6 kPa, 夏季环境气温升高导致

背压超过 10 kPa, 前期系统地对真空系统进行了专项治理, 使机组的真空紧密性有了质的提高, 目前总体漏汽量稳定在 10 Pa/min 左右, 达到了行业的优秀水平。但该改造同时也暴露了运行中的新矛盾: 水环真空泵设计抽气量预留空间过大, 设备性能未得到充分发挥, 节能潜力巨大, 随着季节气温的波动, 真空系统的性能会受到很大的影响。在夏季高温环境中, 工作水温度持续升高, 水饱和蒸汽压力也随之增加, 直接影响水环密封效果, 在这种情况下, 抽吸介质中混入了大量的蒸汽, 造成水环真空泵的实际抽气量大大降低, 不凝结气体得不到及时排出, 最终导致真空度下降, 真空度每下降 1 个单位, 就需要消耗更多能源来维持正常运转, 消耗的热量也会随之增加, 这不仅会导致燃料成本上升, 还会导致发电效率下降, 从而形成高能耗、低利润的恶性循环, 如果长时间处于这种非经济性的工作状态, 设备的损耗也会增加, 维护的频率和费用也会随之增加, 利润也会进一步被压缩。虽然已经进入了冬季, 但水环真空泵本身性能上的缺陷已经成为新的瓶颈, 限制了它的效率, 由于设备本身的原因, 该类型泵的极限真空度仅为 3.3 kPa, 这客观上阻碍了其进一步下潜, 因此, 蒸

汽在透平中的做功能力得不到充分发挥,有一部分热能没有得到有效利用而被排出,直接降低了机组的热效率,这种由于设备设计特征和运行要求不匹配而引起的热经济问题也是不可忽视的^[2]。

2 汽轮机真空系统技术改造的意义

真空系统作为机组运行的核心支撑单元,其技术升级不仅是局部优化,更是牵一发而动全身的关键举措,特别是在当前能源需求刚性增长、“双碳”目标不断推进的背景下,该技术的应用对于发电企业乃至整个电力产业整体效益的提升具有多重战略意义。

在能量转换效率方面,真空系统的性能直接影响到汽轮机功的大小,通过改造,不仅提高了系统的真空度和稳定性,而且有效地降低了汽轮机排汽压力,使蒸汽在缸内的膨胀行程更加充分,能量转化效率也有了飞跃。这种变化最直观地体现在发电指标上:煤炭消耗量大幅度降低,单位用电量降低,电厂的燃料成本压力得到极大缓解,企业的经济效益显著提高,更重要的是,高效利用蒸汽能降低无效损失,等于从源头上提高能源资源的集约利用水平。

而设备的可靠性,也得到了明显的改善,传统的真空系统在运行过程中容易受到工况波动的影响,在运行过程中经常出现真空度不稳定的现象,导致机组振动加剧和叶片磨损,不仅增加了检修的频率,还可能造成非计划停机。而升级后的真空系统,通过优化密封,提高抽气效率,可以有效地抑制真空波动,减少由于异常工况引起的机械应力,降低设备的故障率,延长使用寿命,这不仅减少了在备件更换和维修方面的人力、物力投入,还能保证机组持续运转,避免突发停机对电力供应和生产秩序的影响。

环境保护是转型的另一个重要落脚点,提高真空系统效率,可降低煤炭等化石能源的消耗,直接减少燃烧过程中产生的二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物等污染物的排放总量,本项目的研究成果将为我国发电企业履行环境保护主体责任,缓解区域环境压力,积累电力行业绿色低碳转型的实践经验^[3]。

值得注意的是,这类技术改造还会产生明显的辐射效应,在改造过程中探索出的新技术、新材料的应用方案和系统优化方法,可以为同类型机组的升级改造提供可借鉴的范例。这种技术溢出,不仅可以带动相关设备制造、运营服务等产业链的技术迭代,还可以促进整个电力行业在设备可靠性管理、节能降耗技术应用等方面形成新的能力体系,提升我国电力行业在国际市场上的核心竞争力。

3 技术改造方案

3.1 改造方案

新增加一套高效率的抽真空泵组,并与原真空泵系统并联到凝汽器抽真空母管中。在正常运行中,凝汽器的真空维护由高效率泵组承担,原水环真空泵改为热备用。采用了罗茨真空泵+水环真空泵的串联结构,实现了高效率泵组的设计。具体流程为:由凝汽器抽真空母管来的气体通过支管导入罗茨真空泵入口,通过罗茨泵进行增压,然后送至级间冷凝器进行冷却。在这个过程中,大部分的水蒸气是通过冷却而析出的;然后,未冷凝的气体 and 少量残留的水蒸气进入水环真空泵。罗茨泵的升压特性有效地提高了燃气压力,为随后的凝结创造了条件;中间冷凝器吸收循环冷却水中的凝结潜热,保持较低的温度,从而达到高效除水的目的。经过处理的气体进入水环泵,由于罗茨泵的增压作用,提高了进气压力,从而避免了水环泵气蚀的发生。传统水环泵的真空极限在 3.3 kPa 左右,高效泵组可以达到 500 Pa,大幅降低了机组的背压,提高了整体真空度。在启动初期,仍采用传统的真空系统快速建立真空,待运行参数稳定后,再切换到高效率泵组来维持真空;为了保证系统的可靠性和经济性,原水循环泵保留备用功能。在结构上,高效率泵与原有的水环泵并列、互补,罗茨泵是干式泵,无水蒸气腐蚀问题,并对水环泵的进气条件进行了优化,提高了系统的运行稳定性。

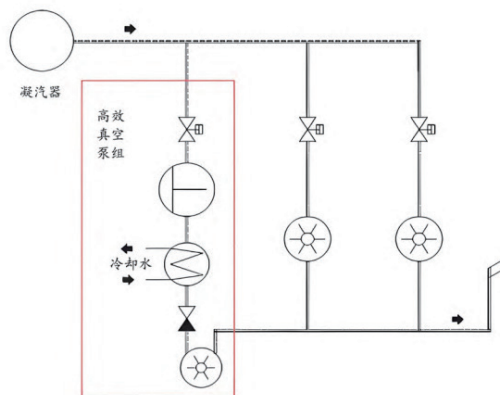


图 1 高效抽真空系统

3.2 联锁保护设计

3.2.1 罗茨泵与水环泵的联动启停控制

本项目以罗茨真空泵和水环真空泵协同运行为研究对象,构建逻辑绑定的启停联动机制。具体来说,罗茨真空泵启动需要水环真空泵稳定工作,并在水环真空泵停止指令发出时停止。这种双向约束设计完全避免了单机运行可能引起的系统干扰,在保证双水泵工作状态一致性的同时,

有效减少因非协同运行引起的能量冗余问题^[4]。

3.2.2 泵组状态与罗茨泵入口蝶阀的联动调节

为了优化系统运行效率和加强设备保护,在罗茨真空泵进口位置设置了电动蝶阀开关,实现了泵组启动和关闭状态的联动,当泵组进入工作状态后,蝶阀会自动开启,保证过程气体顺利导入罗茨泵,参与抽气流程;当泵组停止运转时,蝶阀会立即关闭,防止反向气流倒流和外来杂质引入,从而降低设备的损耗,延长核心零部件的使用寿命。

3.2.3 故障停机时的联锁报警与备用切换机制

针对设备突发故障时的应急需求,本系统建立了完备的故障响应链路,当任何一台泵机组发生非正常停机时,故障信号会立即上传至监控平台,同时触发 DCS 系统联锁指令,使预置的备用真空泵组自动启动,无缝承接故障设备的抽气任务,该设计极大地提高了系统的抗风险能力,使非计划停工期达到最短,保证了生产的连续性。

3.2.4 低真空度触发的大泵联动增压逻辑

由于真空稳定度是影响生产过程的关键因素,增加了多级联动增压保护装置。当系统真空度低于工艺阈值时,控制系统会自动启动大功率水环真空泵,利用多台水泵的协同作用实现真空环境的快速提升,避免真空不足引起的产品品质波动和生产线停滞。该机制在强化工艺控制精度的同时,为高真空度要求的工艺过程提供双重保证^[5]。

3.3 可靠性分析

为了提高抽气系统的运行效率,对原抽气管道进行了改造,增加了一套高性能的真空泵。系统流程调整为:经过中间级冷凝器冷却冷凝的气体,再由一台低功率水环泵排出。原机组配有两台水环真空泵,作为关键备用,以保证极端工况下的稳定运行。在机组启动阶段,原真空泵继续采用传统的方式协同运行。当机组稳定运行,真空度合格,密封性得到验证后,系统切换到单套高效率真空泵组,原有的两台大型水环泵改为热备用。在运行过程中,如果真空系统突然泄漏,高性能泵组的抽气能力有限,不能保持真空的情况下,设备将自动启动保护机制,切换到原水环泵,以保证真空度;当任何一台设备出现故障时,备用真空泵会立即启动,切断进水管,使系统达到最大的真空度。值得注意的是,改造后的真空泵机组备份方式由原来的一用一备改为一用二备。目前两台水环泵仍然保持着传统的互为备用策略,但是新增加的高效泵组投入运行后,在正常工况下只需要一套高效机组就能满足要求,系统的抗风险能力明显提高。在性能方面,高效率真空泵的极限

真空度超过了 500 Pa,比之前的 3.3 kPa 有了质的飞跃。这一改进不仅满足了真空泵的选择设计规范,而且突出了它强大的抽气能力。提高抽气效率完全解除了背压极限,从本质上增强了真空系统的性能,为机组的安全稳定运行提供了更加可靠的保证。

4 抽气量核算

本电厂 85 MW 机组配设两台水环真空泵,一用一备。这一部分通过对冬季和夏季典型工况的抽气需求量的计算,确定了真空泵组的选择依据。

冬季运行情况:冬季机组最低背压应高于 3.3 kPa,这时真空泵进口温度约为 21.5℃,相当于 2.6 kPa 的蒸汽分压力。考虑到真空系统的紧密性和漏气量,计算出在这种情况下,气—气混合物的体积流量需要为 845 m³/h 才能满足抽气要求。

夏季工况分析:当机组在夏季蒸汽压力最大值上升到 10 kPa 的时候,抽真空泵进口温度上升到 41.6℃,对应的是 8 kPa 的蒸汽分压力。同样,按照 200 帕/分钟的真空紧密性和 7 公斤/小时的空气泄漏量来计算,此时,混合气体的体积流量大约是 316m³/小时。

从冬季和夏季两种极端工况来看,冬季用水量明显大于夏季。因此,选择单台抽气量大于 845 m³/h 的高效率真空泵组,就能满足全年工况的抽气需求。

罗茨真空泵采用罗茨真空泵,其抽气速度不受水环泵工质温度波动的影响,保证了泵的持续稳定运行;与湿泵工作介质温度依赖关系相比,罗茨真空泵的抽气效率与水环泵工质温度没有直接关系,充分体现了其工作性能可靠性^[6]。

5 经济效益分析

针对原水环真空泵运行中存在的能耗高的问题,公司实施了一种新型高效抽气装置,进行了设备更新改造。原机组配有 75 kW 水环真空泵,年运行时间长达 6000 小时,长时间内运行电流约 96 A,耗电水平较高。改造后投入使用的 30 kW 高效率水泵组,使其工作电流降低到 30 A 左右,并大大简化了整体功率结构,减少了电能损失。通过实测和计算,新老设备之间的功率差为 45 千瓦,再加上年平均 6000 小时的运行时间,每年用电 45 千瓦 × 6000 小时 = 27 万千瓦时。按现行电价每度 0.7 元计算,每年节约的电费支出为 27 万千瓦时 × 0.7 元/千瓦时 = 18.9 万元。这个数据很直观地反映了改造对成本的直接优化作用。从投资回报来看,这次的设备更新总投资在 70 万元左右。假设每年可节省 18.9 万元的电费,则可达到 3.7 年 (70 ÷ 18.9)

的静态投资回收周期，也就是 4 年内就能回本。在此基础上，持续节电效益将直接转化为公司净利润，形成长远的经济效益。

6 结语

综上所述，这次真空泵系统的升级改造，不但保证了设备在各种工况下的稳定、高效运行，而且对企业的经济效益有很大的促进作用。这一转型实践也反映了当前发电商为实现能源精细化管理和绿色转型所采取的主动行动。在环保政策日趋严格的背景下，通过技术创新、设备优化等手段，实现节能降耗，提高能源利用率，是实现企业可持续发展的重要途径。

参考文献：

[1] 郝艳峰，郝林. 一种汽轮机真空系统改造技术[J]. 中

国科技信息，2025,(14):71-73.

[2] 兰亚军，关静华. 电厂汽轮机真空改造技术应用与效果分析[J]. 电力设备管理，2024,(17):234-236.

[3] 朱伟峰. 汽轮机低真空供热改造技术探讨[J]. 中国设备工程，2023,(03):142-145.

[4] 徐明. 汽轮机真空系统中抽气器运行方式优化的技术改造[C]// 中国电力技术市场协会. 2022 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集. 华电湖北发电有限公司武昌热电分公司，2022:839-844.

[5] 郝晶. 汽轮机低真空供热改造技术的分析[J]. 清洗世界，2021,37(10):132-133.

[6] 李广伟，陈鑫. 9F 燃气 - 蒸汽联合循环机组运行优化及节能改造[J]. 节能，2019,38(04):76-79.