

凝结水系统运行优化与节能增效措施

郝佳欣 张四虎

国能锦界能源有限责任公司 陕西榆林 719319

摘要: 作为火电、化工等行业中能量转化的重要组成部分, 凝结水系统的工作效能对整个系统的能量消耗和经济性能有着重要的作用。通过对凝结水系统的合理优化, 可以实现对高温冷凝水的高效利用, 减少了空冷风机电耗和补充水分的量, 从而达到节约能源消耗、提高运行费用的目的。“双碳”战略下, 实施冷凝系统的操作优化和节能减排, 可打破常规操作方式能耗高、调控滞后等技术瓶颈, 大幅提高能源利用率。本项目的研究开展, 将促进我国能量分级开发的新方法, 为建立企业的智能节能系统奠定基础, 对促进我国产业的节能减排与绿色转型, 具有重大的现实意义。

关键词: 凝结水; 运行优化; 节能增效

1 凝结水系统概述

在电厂、核电站等热力系统中, 冷凝水系统是对蒸汽冷凝液进行有效收集与处理的关键设备。其关键作用是将汽轮机排出的乏蒸汽凝结成液体, 并经纯化后再回输到锅炉供水, 从而达到回收再使用的目的, 从而保证整个热力系统的安全、稳定。

凝结水系统主要由空冷岛, 凝结水泵, 低压加热器, 脱氧装置等设备构成。空冷岛是机组的主要部件, 在凝结水系统中, 它将汽轮机排出的乏汽冷凝为水, 维持真空环境, 确保热力循环效率, 同时减少水资源消耗。冷凝泵主要从冷凝水箱中抽取冷凝水, 通过密封式加热炉及多段低压加热炉逐级加热, 再通过蒸汽排出的废热对供水进行加热, 以改善系统的热负荷。除氧器采用的是物理脱氧的方法脱除水中的氧气和其他气体, 起到保护装置的作用。同时, 该工艺还配有一套精细的工艺设备, 经离子置换、过滤等工艺除去其中的杂质, 保证出水符合锅炉用水的要求^[1]。

2 凝结水系统运行优化措施

2.1 设备维护与状态监测优化

为保证冷凝水装置的正常运转, 必须对其进行定期的维修保养。对凝结水泵、疏水泵、阀门和管路接头等进行检修及其故障诊断。采用振动分析、温度监测及油液质量测试等方法, 可以对其工作状况作出评价, 并根据其特征构建其健康状况档案。针对重要装备, 如冷凝泵轴承座, 有必要按月收集其振动谱, 并将其与以往的测试结果进行比较, 找出是否存在异常的频段。另外, 每两个月要进行一次密封试验,

利用超声波检漏装置对内部渗漏部位进行检测, 并将渗漏情况进行详细的统计。为了消除因热应力导致的管道支撑结构变形风险, 建议每半年进行一次检查。

2.2 运行参数动态调整策略

为满足不同工况下的机组负荷要求, 必须对凝结水量进行动态调节, 并在此基础上构建相应的计算模型。例如, 在小负载时, 采用变频技术可以使冷凝泵的速度下降到最佳工作范围, 一般下降幅度不超过其额定速度的 60%~85%。在此基础上, 对凝结水箱的液位以及凝结水变频与除氧器上水调门进行优化调节, 利用模糊 PID 的思想取代常规的比例调节方式, 使汽包水位的变化幅度由 ± 50 mm 降到 ± 20 mm。针对多个并行的冷凝泵系统, 采用压力反馈实现多个泵输出的平衡控制, 以减少单个泵的超载^[2]。

2.3 水质控制与化学处理强化

建立凝结水导电率的三级预警机制, 在发现精处理系统入口凝结水导电系数大于 $0.3 \mu S/cm$ 时, 应及时启动排盐方案; 如果导电率大于 $0.5 \mu S/cm$, 就要将其锁定并开启备用精炼装置。精处理系统由前置过滤器与混床组成, 混床树脂在电导率大于 $0.12 \mu S/cm$ 时切换运行。对加氨量进行了合理的调控, 通过前向-反馈的组合调控方式, 使给水 pH 保持在 8.8~9.2 之间; 凝结水经精处理后的 pH 值需控制在 9.2~9.6 之间。每星期检查一次凝结水含铁量, 如有超出 $10 \mu g/L$, 应马上进行前置过滤器清洗。通过对加热炉的疏水部分进行在线氧气检测, 如果检测到大于 5 ppb 的溶氧, 应首先检查是否存在真空系统的密封情况。

2.4 控制系统智能化升级

构建基于分布式控制的冷凝水数字化双胞胎实验平台,将DCS的实时信息与装置的3D建模相结合,完成针对突发事件的模拟与应急演练。研制新的凝结水泵高效优化方法,实现在目前工作状态下,按15min自动求出最优操作组合。在此基础上,运用机器学习方法,对超过90%的气门卡涩迹象进行辨识。在操作界面上增加能耗监控面板,对每吨水电耗、热耗等12个重要数据进行实时展示,从而达到了提升设备工作的有效性和可靠性的目的。

2.5 管道系统阻力特性优化

采用压力差传感网络对高阻管段进行每个季度的流量测量。针对弯管数目大于5个的情况,进行结构改建,将直角弯换成大曲率弯曲管,从而使管道的局部摩阻因子下降40%~60%。通过在冷凝水回流管线上安装文丘里节流器来取代常规的阀门,预期每年发电功率达到12~18 MWh。通过对管内壁隔热层的厚度进行优化,对壁面50°C以下部分采用双级硅酸铝隔热,降低了35%的热量散失。

3 凝结水系统节能增效措施

3.1 系统优化设计

(1) 优化电网的能力分配。针对各机组的特点,采用基于机组负载特点的冷凝水量配比方法,实现机组在不同工况条件下的高效运转。利用模块化的思想,对整个软件进行了柔性扩展,保证该软件能够满足用户的需要。另外,根据热力学分析,得到较优的冷凝泵的水头和流速,从而解决因重复设计而造成的无效功率消耗问题。在此基础上,通过对管网布局进行优化,降低管网内的摩阻损耗,利用变直径管网技术均衡各分支管网间的压差,提高管网的整体性能。(2) 采用变频调速的方法。在冷凝泵调速方面,采用基于矢量变换器的方法,对冷凝池的液位和压力进行了双参量的反馈。通过对冷凝水的压力进行在线监控,可以对水泵机组的速度进行动态控制,使阀门的调节比率低于15%。当多台水泵并列工作时,根据负载的改变,可以实现水泵数目的自动开关,保证各水泵总是工作在一个高效能区域,这样就可以使整个机组的工作效率得到更大的提升,达到节约能源的目的。(3) 热动力系统的最优控制。建立凝结水与锅炉供水的耦合数学模型,并对其工作压力和凝结水的水温进行最优匹配。通过提高冷凝水和高温水的换热效率,使脱氧汽耗大大减少。在此基础上,设计二次冷凝回路,实现废热回

收在低压供热中的高效使用^[3]。

3.2 运行管理优化

(1) 精细工艺参数的调控。通过对冷凝水溶解氧、电导率等关键参数进行实时监控,对回水处理过程进行实时调整,达到更加精细化操作的目的。对脱铁滤池的反冲洗循环进行优化,采取压力差-时间双控制方式,降低无效冲洗的数量。通过调整冷凝液罐过冷量,有效地减缓该装置的氧气侵蚀速度,提高了装置的运行寿命。(2) 智能化故障检测技术的实际运用。在此基础上,利用大数据技术搭建机组运行工况监控系统,建立机组振动谱特性数据库和机组运行的早期预警模型。在此基础上,利用模糊控制的方法对启动和停止过程进行了优化,从而缩短了系统的非稳定操作次数。在此基础上,构建管线腐蚀速度预报模型,用于指导检修期的制定,提升管线的安全可靠度及运营效益。(3) 经营方式的革新。应用基于动态调节的冷凝水系统负载跟踪控制方法,使其能够随着负载的改变而实现经济操作。研究制定基于能耗和热回收率等多维度的能源效率目标管理体系。通过对冷凝水系统进行寿命期造价管理,将初期投入和后期维修投入进行综合分析,使整个过程达到了较好的经济效益^[4]。

3.3 余热回收利用

(1) 低气压水热回收工艺。增加了闪蒸槽,对高温冷凝水的剩余压力进行回收,从而产生低压蒸汽用于厂区辅助系统。通过对闪蒸水与一次水的耦联形式进行了优化,利用引射器提高了低汽度。在此基础上,构建分级闪蒸体系,对各阶段的能源进行分级利用,以达到提升整体能源效率的目的。(2) 综合利用热泵。为提高冷凝水的品位,对其进行吸附式热泵,使其达到了将其转换成过程热量的目的。涉及应用新型的双效循环热泵,即通过加热蒸气的潜热提高制冷系数。在此基础上,开发应用利用有机兰金循环的废热发生器,实现低于80摄氏度的低温热能转换为电力。(3) 相变蓄能技术的研究与开发。采用新型的相变储能设备,对其进行空间和时间上的合理分配。通过改变相变过程中的相变温度,使其与实际需要的热量相适应,从而提高能源的利用率。构建固-液相变和显热蓄冷一体化体系,打破单个蓄冷工艺对低温环境的制约,提升能量利用率。

3.4 设备升级改造

(1) 高效率液力传动装置的使用。利用三次流浆对冷凝泵进行优化,使其在设计状态下的运行效率提高3~5%。

采用电磁支撑的方法减小水泵的机械损耗，减少水泵机组的振动和噪声。在此基础上，进一步拓展 PMSM 传动技术，使其能够有效地将电能和机械能相互转化。（2）新型传热元件开发。研究开发一种新型的增强传热管壳式换热器，在其内部引入螺旋槽管和内肋管等增强构件，以提高传热系数。采用纳米流体强化冷凝水表面的对流传热，并通过引入功能化的纳米粒子提高其热导率。为减少换热器的结垢率，研制防污染的表面处理技术。（3）智能化配气装置的改造。采用电控调节阀和自力式调节阀组成的组合控制，既能准确地调整流体的流量，又能使压力达到自动均衡。为了改善蒸汽疏水阀的运行性能，可采取前置结构，减小操作压力差的临界值。研制出一种新型的具有快速响应特性的压电型阀，提高了系统的动态调整质量。

3.5 能源管理体系建设

（1）能源消耗监控系统建成涵盖整个系统的能量测量系统，配备智能电表和温差计等监测设备。通过对能耗的实时监测和能量效率的研究，研制能耗管理信息系统。可建立一套以物联网为基础的远程监测系统，为用户提供多个设备接入和故障预警功能，以提升能耗管理的有效性和精确性。

（2）使经营过程规范化。对冷凝水的操作和维修进行详细的规定，并对设备的启停和切换操作程序进行标准化。制定能源效率审核体系，并对其进行定期的热工试验和损耗分析。实行“全员节约用能”责任制，把能源消耗目标层层分解到每个作业人员，这样就可以有效地改善整体的能量利用。（3）不断提高的制度。实行 PDCA 循环，对各项节能工作的执行情况进行定期考核。设立专门的技术储备库，以追踪新能源科技的发展动向。同时，通过行业内同行对标分析，吸收国际上的先进企业经营理念，不断地完善执行计划，保证了整个体系的不断完善与优化。

3.6 系统集成与协同优化

（1）多能流耦合分析。对冷凝水量和整套机组的能耗进行数学建模，并对各环节之间的相互作用进行分析。在此基础上，设计多目标寻优方法，以获得经济和能源效率之间

的最优平衡。以能源的高效利用为目标，研究冷凝-可再生能源耦合系统的协调控制方法。（2）系统动力学性能的最优设计。建立冷凝水系统动力学的数学模型，并对其进行分析。通过对控制器的调整，使其具有更强的抗干扰性。应用基于前向反馈的混合控制器，以减少切换时间，改善系统的动力学特性与稳定性能。（3）全生命周期优化。利用价值工程的原理，对前期投入和运营成本进行全面的评价。通过对装备老化程度的预报，对装备的更换时间进行了优化。在此基础上，提出以可靠性为核心的维修战略，在保证系统长周期、高可靠性的同时，兼顾维修费用和使用寿命^[5]。

结语

在碳达峰、碳中和目标愿景下，节能减排与系统优化已成为凝结水系统运行的关键。凝结水系统的调整和运行直接关系到机组运行的经济性、安全性和灵活性。针对凝结水系统运行特点，从经济性、安全性和灵活性调控三个方面综合考虑，本文合理论述凝结水系统节能优化措施，希望通过上述研究，有望大幅提高凝结水系统的经济性和调节灵活性，为国家“双碳”战略的实施提供一条崭新的思路。

参考文献：

- [1] 谢德勇 .1000MW 机组凝结水系统优化改造研究 [C]// 中国电力设备管理协会 .全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集（六）. 国能寿光发电有限责任公司 ;,2024:104-106.
- [2] 张飞跃, 史俊杰 .煤制油凝结水处理系统优化改造 [J]. 煤化工 .,2022,50(06):106-108+123.
- [3] 崔向前 . 某 1000 MW 机组凝结水系统节能应用分析 [J]. 应用能源技术 .,2022,(10):46-49.
- [4] 王宏纲, 王念龙, 花道君 . 燃煤火电机组凝结水系统节能安全控制优化实施 [J]. 仪器仪表用户 .,2022,29(07):88-91+77.
- [5] 黎乃斌, 姚永良 .660MW 燃煤机组凝结水系统运行方式优化 [J]. 机电信息 .,2020,(12):77+79.