

# Energy-saving optimization analysis of condensate recovery in secondary circuit thermodynamic system

Wei Wang

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

The secondary circuit thermodynamic system serves as a critical component in thermal power generation equipment such as coal-fired and nuclear power plants. Its operational efficiency directly impacts energy consumption and economic performance of power units. As a secondary thermal energy carrier generated during system operation, condensate contains substantial recoverable heat. Inadequate recovery or inefficient utilization can lead to significant energy waste and economic losses. This study focuses on condensate recovery and utilization in secondary circuit thermodynamic systems, detailing system composition, condensate characteristics, and theoretical foundations for recovery. It analyzes current operational status and major challenges in recovery systems, quantifies energy consumption impacts, and identifies potential energy-saving opportunities. Energy optimization solutions are proposed from four perspectives: design principles, equipment, process flow, and control strategies. By scientifically improving condensate recovery models, this research aims to enhance system thermodynamic efficiency, reduce energy consumption per unit of electricity generation, and provide technical support for energy conservation and green operation of thermal power units.

## Keywords

Secondary circuit thermodynamic system; Condensate recovery; Energy-saving optimization; Thermal efficiency; Economic analysis

## 二回路热力系统疏水回收利用的节能优化分析

王伟

大亚湾核电运营管理有限责任公司, 中国·广东深圳 518000

## 摘要

二回路热力系统是火电、核电等热力发电设备的关键, 二回路热力系统运行效率的好坏直接影响到机组的能耗和经济效益。疏水作为系统运行中产生的二次热能载体, 含有大量可以回收的热量, 回收不充分或者利用不合理都会造成严重的能量浪费和经济上的损失。本文以二回路热力系统疏水回收利用为研究对象, 论述系统组成、疏水特性及回收理论基础, 分析目前回收系统运行现状及主要问题, 量化能耗影响并挖掘节能潜力, 从设计原则、设备、流程、控制策略四个方面提出节能优化方案。希望通过科学地改进疏水回收模式可以有效地提高系统的热力效率, 降低单位发电量的能耗, 给热力机组节能降耗、绿色运行提供技术支持。

## 关键词

二回路热力系统; 疏水回收; 节能优化; 热力效率; 经济分析

## 1 引言

能源短缺和环保要求日趋严格的情况下, 热力发电行业作为能耗大户, 节能降耗成了转型发展的主要目标。二回路热力系统担负着蒸汽热能转化为机械能的重要任务, 运行中产生大量的加热器疏水、管道疏水、设备启停疏水等高温高热疏水, 直接排放或者简单处理不但会造成热能的浪费, 还会破坏水质平衡, 增加补水与环保费用。国内大部分热力机组二回路疏水回收系统存在设计缺陷、设备老化、控制粗放等问题, 造成回收效率低、热能利用率低, 低效回收

模式会使机组热力效率下降 2% 到 5%, 造成较大的经济损失。因此, 研究疏水回收节能优化途径, 用理论分析与方案设计解决现有的问题, 对提高机组的经济性, 促进热力机组绿色低碳发展有重大的意义, 可以为热力机组的节能改造提供参考。

## 2 二回路热力系统疏水回收利用相关理论基础

### 2.1 二回路热力系统组成及工作原理

二回路热力系统是热力发电机组(以火电为例)的重要组成部分, 主要由汽轮机、凝汽器、低压加热器、除氧器、高压加热器、给水泵、蒸汽管道及附属设备组成, 主要功能就是实现蒸汽的循环利用和能量转换。其工作原理是: 锅炉产生的高温高压蒸汽(主蒸汽)进入汽轮机膨胀做功, 推动汽

【作者简介】王伟(1987—), 男, 中国安徽池州人, 硕士, 工程师, 从事核电运行研究。

轮机转子旋转带动发电机发电；做功后的乏汽进入凝汽器，用循环冷却水冷却凝结成凝结水；凝结水经低压加热器加热后送入除氧器，去除水中溶解氧防止设备腐蚀；除氧后的给水经给水泵升压，再通过高压加热器进一步加热到对应温度后送入锅炉，完成一次完整的热力循环。循环过程中各个加热器、蒸汽管路、设备的排疏水与回收，都是保证系统正常运转、减少热能损失的重要环节。高压加热器、低压加热器作为热量交换设备，疏水的合理回收可以利用蒸汽冷凝过程放出的热量，提高给水温度，减少锅炉加热负荷，从而提高整个系统的热力效率<sup>[1]</sup>。

## 2.2 疏水的产生机理、特性及分类

疏水的产生是二回路热力系统运行过程中不可避免的现象，其主要产生机理是蒸汽在热量交换、输送以及设备启停过程中，由于温度降低或者压力变化而发生冷凝，形成液态水。疏水产生主要来自三个方面：第一是加热器内的换热过程，主蒸汽或者抽汽在加热器内与给水进行热交换之后，自身冷凝形成疏水；第二是蒸汽管道的散热损失，高温蒸汽在管道输送过程中由于管道保温层散热造成部分蒸汽冷凝，产生管道疏水；第三是设备启停和异常工况下，系统内蒸汽压力、温度突然变化，产生启停疏水或者事故疏水。疏水有明显的热能特性和水质特性：从热能上看，疏水温度一般在100℃至300℃之间，压力在0.1MPa到10MPa不等，具有较大的显热和潜热，有很高的回收价值；从水质上看，疏水经过系统内部循环，杂质含量低，水质指标基本符合给水要求，可以直接或经过简单处理后重新投入系统循环，减少补水量和水处理成本。按照产生来源和工况来分，疏水可以分为三类：第一类是加热器疏水，包括高压加热器疏水（HPH）、低压加热器疏水（LPH），占系统总疏水量的70%~80%，是疏水回收的重点；第二类是管道疏水，产生于主蒸汽管道、再热蒸汽管道和辅助蒸汽管道，疏水量随管道长度、保温效果和环境温度变化而变化，有间歇性特点；第三类是特殊疏水，包括设备启停疏水、事故疏水、除氧器疏水等，这类疏水不稳定，但是温度和压力波动较大，回收难度大。

## 2.3 疏水回收利用的核心方式及节能原理

二回路系统疏水回收的主要方式有逐级自流、疏水泵强制回收、疏水冷却器回收三种，根据不同的工况选择使用，均符合热能梯级利用和能量损失最小化的原则。逐级自流回收应用最广，依靠各加热器疏水的压力差，把高压疏水逐级自流到低压加热器、除氧器或凝汽器，实现热量二次交换，高压加热器疏水自流到除氧器加热给水，具有节能和提效的作用。该方式不需要额外的动力，维护成本低，但是受压力差的影响，热量的回收不够充分，低温疏水容易造成热能的损失。

疏水泵强制回收适用于低压疏水，用疏水泵升压将疏水送入对应的加热器或者给水管道的强制循环，避免直接排入凝汽器的热量损失，回收效率高于逐级自流。但是需要消耗

电能驱动水泵，增加设备投资和运维成本，存在能耗抵消的风险。疏水冷却器回收就是通过在管道上设置冷却器，用疏水加热低温给水或凝结水，降温后再排入后续设备，可以充分利用显热、减轻凝汽器负荷，提高系统效率。该方式通常同前两种方式相结合，组成复合回收系统，既考虑了效率又考虑了经济性。疏水回收的主要目的在于降低系统冷源和热损失，把排放的疏热能重新利用，提高给水温度、降低锅炉燃料消耗（火电）或反应堆热负荷（核电），最终实现能耗降低、效率提高。

## 3 二回路热力系统疏水回收利用现状及问题分析

### 3.1 现有疏水回收系统配置及运行现状

国内大部分现役机组疏水回收系统采用逐级自流为主、疏水泵辅助的方式，主要设备有疏水管道、疏水泵、调节阀、冷却器和液位控制器。高压加热器疏水自流到除氧器，低压加热器疏水一部分自流到凝汽器，一部分经水泵送到给水管道的；管道疏水经过扩容器减压降温后，大部分排入凝汽器或者地沟；特殊疏水在启停、事故状态下，经过扩容器冷却后进入凝结水系统。新建机组设备较全，配装智能液位控制装置、高效冷却器等设备，回收效率大于85%；老旧机组的设备因设备老化、设计落后等缘故，运行不稳定，回收效率一般低于70%。火电机组以加热器疏水回收减少燃料消耗为主，核电机组因水质要求高，严格控制回收路径和水质，热能回收优先级较低。大多数机组采取固定回收模式，没有工况自适应调节能力。

### 3.2 疏水回收利用存在的核心问题

结合行业现状，疏水回收利用核心问题可归纳：一设计不合理，缺少热能梯级利用。部分机组没有根据疏水温压等级分类回收，高温疏水的热量被低温介质稀释；管道布置过长、保温不好导致热损失大；缺少专用管道疏水回收设备，管道疏水直接排入凝汽器，回收率极低。由于设备老化衰减造成运行效率低。老旧机组疏水泵、调节阀、冷却器等主要设备出现磨损、泄漏、结垢现象，疏水泵效率降低10%~15%，调节阀调节精度不够造成疏水排放，冷却器换热效率降低20%以上，严重影响回收效果。控制策略粗放，动态调节弱。大多数机组使用传统PID单设备控制，没有系统协同调节能力，工况变化时不能及时调整回收路径和流量，升负荷时疏水溢出、降负荷时水泵空耗电能，效率波动大。

### 3.3 问题引发的能耗影响及节能潜力分析

上述问题使系统能耗增加、效率降低。热能损失，每千克200℃疏水直接排放损失约200kJ热量，一台300MW火电机组每天因为回收不足浪费标准煤5~8吨；电能消耗，疏水泵低效运行使单位回收电耗增15%~25%，凝汽器负荷上升进一步推高循环水泵电耗；补水能耗，疏水排放增加补

水量,新水水处理需要消耗更多的电能和药剂,提高综合能耗。疏水回收节能潜力很大,根据调研数据可知,改造后的老旧机组热力效率可提高1.5%~3%,单位煤耗降低3~8g/kWh,新建机组优化后煤耗还可降低2~5g/kWh。以300MW机组为例,煤耗降5g/kWh、年发电量20亿kWh,则年节约标准煤1万吨、减碳2.6万吨,降低综合成本约200万元,经济效益和环保效益都很明显。就行业而言,全国现役机组进行疏水回收优化之后,每年可以节约标准煤数百万吨、减少温室气体和污染物的排放,给电力行业实现“双碳”目标提供重要的支撑<sup>[2]</sup>。

## 4 二回路热力系统疏水回收利用节能优化方案设计

### 4.1 优化设计原则

优化方案要符合四个原则,热能梯级利用,按照疏水温压规划路径,高效利用高品质热能,经济适配,根据机组年限和设备状况选择最优方案,老旧机组侧重改造,新建机组侧重源头设计,安全稳定,保证水质平衡和系统协同运行,智能高效,加入先进控制技术,最大化回收量和热效率。

### 4.2 设备优化方案

设备优化是提升回收效率的核心,针对设备老化、性能不足问题,从三方面优化:一是设备替换升级,将老旧疏水泵换成变频节能型,根据疏水量的变化调节速度,提高效率15%~20%,更换高效疏水冷却器,采用强化换热管材,定期清洗除垢,升级高精度智能调节阀,提高液位控制精度,避免疏水排放。二是新增专用设备,增设管道疏水收集装置和换热器,集中回收管道疏水加热凝结水;为特殊疏水配置精密过滤等处理设备,保证水质达标;在高压加热器出口设置疏水蓄能装置,平衡疏水量波动,稳定系统运行。三是辅助优化,缩短疏水管道的长度,选用高性能的保温材料,热损失减少10%至15%;加固密封设备的基础和连接件,减小泄漏,提高设备运行稳定性。

### 4.3 流程优化方案

流程优化核心是重构回收路径,实现热能梯级利用与流量平衡,针对性优化措施如下:一是加热器疏水优化,采用分级回收、梯级利用的方式,根据压力将高压加热器疏水分三类,高压送入除氧器、中压送入高压加热器入口、低压经水泵送入低压加热器,优化出口位置实现逆向换热,避免热能稀释。二是建立管道疏水优化系统,采用集中收集、

单独处理、梯级利用的方法,在关键管道上设置收集点,疏水经冷却器加热凝结水后,合格送入除氧器、不合格的经过处理达标后回收,禁止直接排放到凝汽器。三是特殊疏水优化,事故疏水、启停疏水设独立疏水路及缓冲罐,启停疏水加热达标后并入正常系统,除氧器疏水经专用水泵送入高压加热器,不干扰换热效果。四是变工况适配优化,设计柔性流程和多路径切换阀门,负荷低于50%时自动切换成疏水泵强制回收,高于80%时切换到逐级自流为主模式,在效率和能耗之间取得平衡<sup>[3]</sup>。

### 4.4 控制策略优化方案

结合智能控制技术优化策略,提升系统动态调节与协同效率,具体措施如下:

建立协同控制系统,通过PLC和DCS集中控制各设备协调操作以达到热效率最大化的目的,自动调节回收流量、路径、设备参数,取代单设备控制。改进调节算法,用模糊PID算法代替传统算法,根据多参数建立模型来适应工况的变化,采用预测控制算法预测负荷趋势,提前进行调节,提高调节精度和调节速度。强化智能监控反馈机制,重要节点处安装高精度传感器可以实时检测疏水压、流量、水质等参数,当出现异常的时候自动改变路线或者开启处理设备,通过数据反馈来不断改善控制参数。加入智能诊断维护功能,把设备故障诊断模型融合进去,监测水泵振动、电机电流等参数来预估故障并发出警告,创建运行台账自动生成维护计划,保证设备的最佳性能。

## 5 结语

综上所述,二回路热力系统疏水回收属于机组节能降耗的重要环节,同运行经济性以及行业绿色发展息息相关。本文对疏水回收理论、现状问题、节能潜力进行分析,从设备、流程、控制策略三个角度设计出优化方案,用热能梯级利用、高效设备配置、智能协同控制来解决效率低、能耗高、稳定性差的问题。实践表明,该方案可有效提高回收效率和热效率,降低能耗成本,具有经济、环保、安全等效益。

### 参考文献

- [1] 石雪延,崔帆,李元,等.核电站二回路停运保养总结及探索研究[J].清洗世界,2024,40(11):7-9+12.
- [2] 靖长财.锅炉吹灰器疏水的回收方案及分析[J].电站辅机,2018,39(04):24-25+42.
- [3] 刘振刚,李太兴,王俊有.热力系统疏水方式的热经济性分析[J].电站辅机,2007,(04):1-2+43.