

循环水泵变频控制系统改造对供热能耗的管控研究

马迎春

北京北燃热力有限公司 北京 102600

摘 要: 循环水泵是集中供热系统的主要耗能设备,其能耗占供热系统总电耗的较大比重。本文针对传统定频运行方式下“大流量、小温差”导致的电能浪费问题,从变频调速节能原理出发,设计了循环水泵变频控制系统改造方案,提出了基于室外温度补偿的前馈-反馈复合控制策略与全工况运行优化方法,并构建了涵盖电耗、热耗和系统综合能效的三级能耗评价指标体系。研究表明,变频改造可通过改变水泵运行工况点使其始终处于高效区,有效降低非满负荷期间的输配能耗,对供热系统节能降耗具有显著效果,可为同类供热系统的节能改造提供参考。

关键词: 循环水泵;变频控制系统;供热能耗;节能改造;控制策略

引言: 集中供热系统是我国北方城镇能源消费的重要组成部分,循环水泵作为热媒输配的核心动力设备,其电耗约占供热系统总电耗的 60%~80%,运行能耗直接影响供热系统的整体能效。传统供热系统中,循环水泵多采用定频运行方式,依靠阀门节流调节流量,大量电能消耗在无效的阀门阻力上,能源浪费严重。同时,“大流量、小温差”的运行模式进一步加剧了输配系统的电耗负担。变频调速技术通过改变水泵转速实现流量调节,可使水泵始终运行于高效区,具有显著的节能潜力。本文从变频调速节能原理出发,研究循环水泵变频控制系统改造方案与运行优化策略,建立能耗评价体系,旨在为供热系统循环水泵的节能改造提供系统性的技术参考。

1 循环水泵能耗特性与变频调速节能原理

1.1 供热系统循环水泵的运行能耗特征

循环水泵是集中供热系统中输送热媒的核心动力设备,其能耗占供热系统总电耗的较大比重。在传统定频运行方式下,水泵以恒定转速运行,当热负荷变化需要调节流量时,通常采用阀门节流或旁路分流方式。阀门节流通过增加管路阻力来减少流量,水泵仍以额定功率运行,大量电能消耗在阀门阻力上,形成“大流量、小温差”的低效运行模式。从能量平衡角度看,循环水泵的有效功率用于克服管路阻力输送流体,而阀门节流消耗的功率转化为无效热量散失。随着供热系统负荷率的季节性和昼夜变化,水泵长期处于部分负荷工况,定频运行方式下的能量浪费问题尤为突出,是供热系统节能潜力的重点挖掘方向。

1.2 变频调速的基本原理与节能机理

变频调速技术通过改变异步电动机的供电频率来调

节电机转速,从而改变水泵的流量、扬程和轴功率。根据水泵相似定律,流量与转速成正比,扬程与转速平方成正比,轴功率与转速立方成正比。当转速由额定值降低 10% 时,流量相应降低 10%,扬程降至额定值的 81%,而轴功率降至额定值的约 73%,即转速的微小降低即可带来功率的大幅下降。变频调速的节能机理在于:通过调节转速改变水泵特性曲线,使其与管路特性曲线的交点始终落于水泵的高效运行区,从而以最低的功率消耗满足系统所需的流量和扬程^[1]。与阀门节流相比,变频调速从根源上消除了节流损失,实现了“需要多少流量就输出多少功率”的精准能量匹配。

1.3 变频改造的节能潜力分析

变频改造的节能潜力与供热系统的负荷率分布密切相关。理论分析表明,水泵转速降至额定转速的 80% 时,轴功率仅为额定功率的 51%,节电率约 49%;转速降至 70% 时,轴功率仅为额定功率的 34%,节电率约 66%。但实际应用中,转速调节范围受限于系统最不利环路资用压头的要求,一般不低于额定转速的 40%~50%。从供热季的时间分布看,初寒期和末寒期的热负荷通常为设计负荷的 40%~70%,运行时间约占总供热季的 50% 以上,这些时段是变频调速发挥节能效益的主要区间。综合估算,采用变频调速替代阀门节流调节,循环水泵可综合节电 25%~40%。此外,变频调速还可减少水泵启停冲击、延长设备寿命、改善汽蚀性能,具有附加的综合效益。

2 循环水泵变频控制系统改造方案设计

2.1 变频改造总体技术路线

循环水泵变频控制系统改造的总体技术路线遵循“方

案设计 → 设备选型 → 系统集成 → 调试投运 → 效果验证”的标准化流程。首先,对既有供热系统的运行数据进行采集与分析,包括水泵额定参数、管网阻力特性、典型日负荷变化曲线及供热季负荷分布,据此确定变频改造的可行性边界与预期节能目标。其次,进行变频器容量选型,以电机额定功率为基础,综合考虑 1.15 ~ 1.20 倍的过载系数,并核算变频器对电网谐波的影响,必要时配置输入/输出电抗器或谐波滤波器。最后,确定变频器安装位置(低压配电室或水泵现场)、冷却方式及防护等级,完成变频改造的总体架构设计,确保改造方案在技术可行、经济合理、安全可靠三个维度达到平衡。

2.2 控制系统架构与硬件配置

变频控制系统的硬件架构采用“上位机监控系统+PLC 控制器+变频器+现场仪表”的四层结构。上位机作为人机交互界面,实现运行参数设定、设备状态监控、数据记录与趋势显示功能;PLC 控制器作为核心运算单元,执行控制算法、逻辑判断与联锁保护;变频器根据 PLC 指令调节电机转速;现场仪表包括压力传感器、温度传感器、流量计和压差变送器,为控制系统提供实时反馈信号。传感器选型应满足供热介质温度($\leq 150^{\circ}\text{C}$)和压力($\leq 2.5\text{MPa}$)的工况要求,精度等级不低于 0.5 级。变频器与 PLC 之间推荐采用 Profibus-DP 或 Modbus-TCP 通信协议,实现高速数据交换。现场控制柜应具备手动/自动切换功能,确保在变频器故障时可手动切换至工频运行,保障供热安全。

2.3 控制策略设计与优化

控制策略是变频控制系统的核心,直接影响节能效果与供热品质。目前主流的控制策略包括恒压差控制、恒温差控制和供回水平均温度控制三种。恒压差控制以供热系统最不利环路的供回水压差为控制目标,通过调节水泵转速维持压差恒定,适用于管网阻力特性相对稳定的系统。恒温差控制以用户侧供回水温差为控制目标,根据温差变化调节循环流量,节能效果更优但对末端调节特性的响应要求较高^[2]。本文推荐采用基于室外温度补偿的前馈-反馈复合控制策略:前馈环节依据室外温度变化预估热负荷需求,提前调整水泵转速设定值;反馈环节依据供回水压差或温差的实测偏差进行修正。复合控制兼顾了系统的响应速度与稳态精度,可有效改善单纯反馈控制响应滞后的不足。

3 变频改造后供热系统运行优化

3.1 变频改造后系统的运行特性变化

变频改造后,循环水泵的运行特性发生根本性变

化,主要体现在三个方面。其一,水泵转速随热负荷变化连续调节,取代了定频运行下的阀门节流调节,使水泵始终运行于高效区。其二,系统流量与扬程的匹配关系改变——在部分负荷工况下,流量和扬程同步降低,管路特性曲线与水泵特性曲线的交点随转速下移,消除了阀门节流造成的能量损失。其三,变频调速范围存在经济性区间,转速过低时水泵效率下降明显,一般不宜低于额定转速的 40% ~ 50%,否则需通过泵组台数调节进行配合。变频与工频的切换需采用锁相环同步切换技术,避免切换冲击对电机和电网造成不良影响,确保系统运行平稳。

3.2 供热品质保障措施

变频调速在降低能耗的同时,必须确保供热品质不受影响,这是变频改造成功与否的前提条件。最小转速限制是保障供热品质的首要措施——当系统负荷较低时,水泵转速不宜无限制下调,需保证最不利环路末端用户的资用压头满足散热设备正常运行的最低要求。若转速过低,系统循环动力不足,远端用户将出现“冷热不均”现象,供热品质显著下降。为此,应在最不利环路末端设置压差监测点,当压差接近设计下限值时触发转速下限保护,防止因过度降速导致远端用户供热不足,保护值应根据系统水力计算结果确定。供回水温差与循环流量的匹配优化是另一项关键措施——变频调节应在保证设计供回水温差的前提下进行,一般供热系统设计温差为 20 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$,实际运行中应尽量维持该温差范围。若温差过小,说明流量偏大存在浪费;若温差过大,则流量不足可能导致末端散热能力下降。此外,宜在分集水器及各分支干管的关键节点设置压力监测点,结合水力平衡分析结果,对变频运行下的系统水力工况进行逐段校核,确保改造后各用户分支的水力稳定性,避免因水泵转速变化引发新的水力失调问题。

3.3 全工况运行优化策略

供热系统在整个供热季中面临大幅变化的室外温度和热负荷,需要针对不同工况制定差异化的运行策略。初寒期室外温度较高、热负荷为设计负荷的 40% ~ 60%,此阶段是变频调速发挥节能优势的最佳时段,宜采用较大的供回水温差和较低的循环流量运行,水泵转速可降至额定转速的 60% ~ 70%,实现最大幅度的节电。严寒期热负荷达到峰值,室外温度接近设计计算温度,水泵可能需要接近额定转速运行甚至全速运行,此时需平衡节能需求与供热安全保障,首要目标是确保极端天气下的热量输送能力满足用户需求,必要时可临时切换至工频运行以提供最大流量,同时需

加密巡检频次, 密切关注电机电流和温度是否超限。末寒期热负荷逐步回归低负荷工况, 系统可再次转入节能运行模式, 但需注意室外温度回升过程中供回水温差的调整节奏, 避免因供水温度过高造成热量浪费^[3]。整个供热季的运行管理中, 应建立基于室外温度分段的变频运行参数表, 将室外温度划分为若干区间, 每个区间对应最优的转速设定值、温差目标值和压差设定值, 通过控制系统实现参数表的自动查表与平滑过渡, 使水泵转速始终与实时热负荷需求保持最佳匹配, 实现全工况高效稳定运行。

4 能耗管控效果评价

4.1 能耗评价指标体系构建

科学评价变频改造的能耗管控效果, 需建立涵盖电耗、热耗和综合能效的多层次指标体系。电耗指标包括单位供热面积循环水泵电耗和单位热量输配电耗, 分别反映水泵运行效率与输配系统能效水平。热耗指标包括管网热损失率, 反映变频调速对系统水力工况和热力工况的综合影响。综合指标采用供热系统综合能耗, 将电耗折算为一次能源消耗后与热耗合并评价。各指标的测算需建立规范的数据采集方案: 电耗数据通过变频器内置电能计量模块或独立电表采集, 热耗数据通过供回水温度、流量和运行时间计算得出, 室外温度作为关联参数同步记录。数据采集频率建议每 15 分钟一次, 按日、月、供热季进行分层统计, 确保评价结果具有统计意义和可比性。

4.2 改造前后能耗对比分析

能耗对比分析应在相同室外温度区间内进行, 以排除气候因素对能耗的影响, 确保对比结果客观可靠。将供热季按室外温度划分为若干区间 (如 -15°C 以下、 $-15^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 、 0°C 以上), 分别统计各温度区间内改造前后的日平均循环水泵电耗和单位供热面积电耗。通过对比分析, 可定量计算各温度区间的节电率和综合节电率。同时, 应对比改造前后的供回水温差变化和系统补水率变化, 以判断变频改造对供热品质和管网安全性的影响。为全面评估改造效果, 宜将分析周期延长至两个完整的供热季, 以消除短期运行波动对评价结果的干扰。建议将对对比结果以图表形式呈现,

直观展示变频改造在不同负荷区间内的节能分布特征。

4.3 综合效益分析

综合效益分析从经济效益、环境效益和社会效益三个维度展开。经济效益方面, 以年节电量和电费节省为直接效益, 以变频器、PLC、仪表等设备投资及安装调试费用为投入, 采用静态投资回收期 and 内部收益率进行经济性评价。变频改造投资回收期通常在 2~4 年, 设备使用寿命可达 10 年以上, 具有良好的长期经济回报。环境效益方面, 根据节电量及所在区域电网的排放因子, 计算减少的二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物排放量, 响应国家“双碳”战略目标^[4]。社会效益方面, 变频改造可提高供热品质稳定性, 减少用户投诉; 降低水泵运行噪音, 改善周边环境; 延长设备使用寿命, 减少维护成本。综合三个维度的评价结果, 全面论证变频改造的技术经济可行性与推广价值。

结束语

本文围绕集中供热系统循环水泵的能耗管控问题, 系统研究了变频控制系统改造的技术路径与运行优化方法。通过分析定频运行方式下的能耗浪费机理, 阐述了变频调速的节能原理与潜力, 设计了涵盖硬件配置、控制策略和运行优化的系统性改造方案, 并构建了多层级能耗评价体系。研究表明, 变频改造通过改变水泵运行工况点, 使其始终处于高效区运行, 是实现供热系统输配环节节能降耗的有效手段。未来, 随着热负荷预测技术、智慧供热平台和人工智能算法的深度融合, 循环水泵变频控制将从目前的被动调节向主动预测方向发展, 为供热系统精细化能耗管控提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 隋军威. 基于 PLC 控制的空调冷却塔循环水泵的变频节能研究 [J]. 新型工业化, 2022, 12(3): 140-142, 148.
- [2] 张庆斌. 循环水泵变频控制在冷库制冷系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(8): 270-271.
- [3] 王聪. 冷库制冷系统中循环水泵的变频控制分析 [J]. 低温与特气, 2026, 44(2): 13-15.
- [4] 张欣. 超临界机组变频循环水泵节能自动控制技术 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(6): 36-40.