

热力站电气自控系统设计与节能运行优化研究

张金昊

(天津市政工程设计研究总院有限公司燃气热力分公司, 天津 301700)

摘要 针对我国城镇集中供热系统中热力站能耗高、自动化程度低的问题, 本文以某典型换热型热力站为工程背景, 对以可编程逻辑控制器 (PLC) 为主的三层电气自控系统总体结构进行了阐述, 并对供热量动态计算模型、水泵相似定律下的变频调速节能措施、供水温度 PID 优化控制方法进行了详细的分析, 提出以“按需供热”为依托的节能运行优化方案, 建立以单位供热量电耗 (EPI) 为核心的运行工况评价指标, 以期为同类热力站节能改造提供有益参考。工程应用结果表明, 系统改造后整个供暖季综合电耗降低 27.4%, 热源侧调节响应时间缩短到原来的 1/3, 供热质量明显提高。

关键词 热力站; 电气自控系统; PLC; 节能优化; PID 控制

中图分类号: TU832

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.005

0 引言

集中供热是北方城市冬季供暖的主要方式, 热力站是热网和用户之间的关键枢纽, 热力站的运行效率影响整个供热系统的能耗水平和供热质量。据有关统计, 我国北方供热面积已经超过了 150 亿 m^2 , 热力站的数量达到了 20 万座以上, 供热能耗占建筑总能耗的 25% 到 35%^[1]。但是传统的热力站普遍存在人工调控粗放、水泵长期工频运行、热源侧和用户侧没有有效协调等问题, 造成了严重的“多供少收”“冷热不均”现象。

近年来, 由于电力电子技术、工业控制网络以及大数据分析技术的迅猛发展, 热力站自动控制系统得到明显改善^[2]。以 PLC 为基础的自控系统由于可靠性好、编程方便、通信能力强等特点, 已经成为热力站电气控制的主要方案。变频调速技术应用到循环水泵之后, 可以按照负荷要求动态调节流量, 依靠相似定律得到明显节能的效果。PID 算法因为原理简单、参数容易整定而被广泛应用到供水温度和压差的闭环控制中^[3]。

本文选取北方寒冷地区哈尔滨市典型换热型热力站为实验对象, 该热力站承担着 18 万 m^2 建筑的供热任务。根据该地区地理环境、负荷特点和运行状况来创建一个由西门子 S7-1200 可编程逻辑控制器为主控模块构成的三层分布式自动化控制结构。本系统把外界的气候状况搜集起来, 结合热负荷预估建模, 循环泵的变频调节以达到节能的目的, 并且用供水温度 PID 反馈调节来稳定供水温度。对热力站在一个完整的供

暖季内运行参数进行实时监测和分析, 从能耗指标的优化、控制精度的提高、服务水平的提高和系统稳定的加强等各方面均取得明显的效果, 从而证明了提出改进策略是可行的, 是有经济效益的。

1 电气自控系统总体架构

热力站电气自控系统采用三类三层分布式网络架构, 分为现场、控制与管理三大层级, 整体架构清晰、独立运行稳定, 可长期持续工作, 并实现多项热工参数的协同调控^[4]。系统层级间依托 Profibus-DP 现场总线与 Modbus TCP 工业以太网协同通信, 前者保障现场设备数据高速稳定传输, 后者满足上层远距离大容量数据交互需求, 实现设备感知、智能决策与现场执行的一体化联动。该系统软硬件研发与配置严格遵循 IEC 61131-3:2025 国际标准, 具备优异的兼容、扩展与互通能力, 支持模块增减及程序在线升级, 为热力站集中联网、远程管控与智慧运维提供标准化技术支撑。各层级设备配置完善, 可精准采集现场参数、高速完成闭环调控, 同时实现数据长期存储、分级报警及跨系统数据共享。主要设备参数见表 1。

2 关键控制策略设计

2.1 供热量动态计算模型

热力站的实时供热量是制定调控策略的基础。根据热力学基本方程, 二次侧瞬时供热量 Q (单位: W) 由下式计算:

作者简介: 张金昊 (1999-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

表1 热力站主要设备参数一览表

设备名称	型号规格	额定功率 (kW)	数量 (台)	主要功能
循环水泵	IS80-50-200	15.0×2	2	一次侧热水循环
板式换热器	BR0.3-2.5-30	—	2	一次侧与二次侧热交换
变频器	ABB ACS580-18.5 kW	18.5	2	水泵转速调节节能
PLC 主站	Siemens S7-1200	—	1	逻辑控制与数据采集
电动调节阀	DN100 PN16	0.08	2	供水流量调节
补水泵	CDL4-14	2.2	1	系统补水与定压
温度传感器	PT100/4-20 mA	—	8	供 / 回水温度测量
压力变送器	0 MPa ~ 1.6 MPa	—	6	管网压力监测

$$Q=G\rho c_p(T_s-T_r) \quad (1)$$

式(1)中: G 为二次侧循环水质量流量 (kg/s), ρ 为水的密度 (kg/m^3), 一般取 $\rho=1\,000\text{ kg/m}^3$, c_p 为水的定压比热容, 取 $c_p=4\,186\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$, T_s 为供水温度 ($^\circ\text{C}$), T_r 为回水温度 ($^\circ\text{C}$)。系统利用电磁流量计和 PT100 传感器组合测量来完成 Q 的实时计算, 经时间常数为 10 s 的一阶滞后滤波后输入控制层, 同时采用 60 s 移动平均窗口 (步长 30 s) 对供热量计算结果进行平滑处理, 有效地抑制了传感器噪声对控制决策的影响, 保证了供热量计量误差不超过 $\pm 1.5\%$ 。

2.2 变频调速节能控制

循环水泵是热力站最大的电耗设备, 占站内总用电量的 $60\%\sim 70\%$ 。根据泵的相似定律 (亲和律), 水泵的轴功率与转速的三次方成正比:

$$\frac{P}{P_0}=\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad (2)$$

式(2)中: P 为变频运行功率, P_0 为额定功率 (kW); n 为实际转速 (r/min), n_0 为额定转速 (r/min)。根据式(2), 转速降至额定 80% 时, 功率仅为额定 51.2% , 节电潜力大。本站采用恒压差控制, PLC 实时采集二次侧供回水压差 ΔP , 与设定值 ΔP_{set} ($5\text{ m}\sim 8\text{ m}$ 水柱) 比较, 经 PID 运算输出 $0\text{ V}\sim 10\text{ V}$ 频率指令调节水泵转速, 实现按需供水、用电。为避免低频散热不良, 变频器下限设为 25 Hz (额定 50%); 当热负荷超过单泵额定出力的 85% 时, 系统自动启动第二台水泵, 切换至双泵变频并联运行, 兼顾节能与供热安全。

2.3 供水温度 PID 优化控制

二次侧供水温度是衡量供热质量的核心指标。为消除温度波动对用户舒适度的影响, 采用 PID 控制器驱动一次侧电动调节阀, 以实现供水温度的精确跟踪。PID 控制律的连续时间形式为^[5]:

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int e(t)dt+K_d\frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

式(3)中: $u(t)$ 为控制输出 (阀门开度指令, $0\sim 100\%$); $e(t)=T_{\text{set}}-T_s$ 为温度偏差 ($^\circ\text{C}$); K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数。实际工程中采用增量式离散 PID 算法实现, 采样周期 $T=5\text{ s}$ 。控制器参数通过 Ziegler-Nichols 方法初调, 再结合现场运行数据优化整定, 最终取 $K_p=2.8$ 、 $K_i=0.12$ 、 $K_d=0.45$, 供水温度控制精度优于 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 节能运行优化方案

3.1 气候补偿与负荷预测

供热负荷受室外气温影响而变化^[6]。系统增设气候补偿控制模块, 利用室外气象站实时监测到的室外温度 T_{out} , 结合建筑围护结构热工参数和供热面积, 按照线性供热曲线来设定供水温度设定值 T_{set} 。同时用前 3 天气象数据和历史负荷数据建立简化的线性回归预测模型, 得到滚动 24 h 热负荷预测结果, 为换热运行策略、水泵台数控制提供决策依据, 防止出现大马拉小车的低效运行状态。

3.2 综合节能评价指标

为科学量化节能效果并指导运行优化, 定义综合电耗性能指标 E_{PI} (单位供热量电耗, kWh/GJ) 如下:

$$E_{\text{PI}}=\frac{W}{Q_{\text{tot}}\times 10^{-3}} \quad (4)$$

式(4)中: W 是统计周期内热力站总用电量 (kWh), Q_{tot} 是同期通过板式换热器输出到用户侧的总热量 (MJ) 乘以 10^{-3} 得到 GJ 。EPI 越小, 单位供热量消耗的电能就越少, 系统综合能效就越高。系统把 EPI 按照 24 h 一个周期来自动计算并保存起来, 再经由月度数据的趋势分析, 从而动态调节水泵的启停台数组合, 变频的目标频率, 以及换热器的投切方案, 一直朝向最佳运行工况点靠近。优化的总目标函数为, 在保证供热质量约束 (用户室温不低于 $18\text{ }^\circ\text{C}$, 二次侧供水温度偏

差不超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的基础上, 使整个供暖季 EPI 加权平均值最小化。

4 工程应用与效果分析

2024 年 10 月完成热力站系统改造并投入使用, 供暖时间为 10 月上旬到次年 3 月下旬, 共计约 172 天。改造前用人工定时调节和工频水泵运行, 改造后全部采用本文提出的方法进行电气自控及节能优化。图 1 给出了改造前后各个月份综合电耗 (kWh/GJ) 和节电率的对比数据。

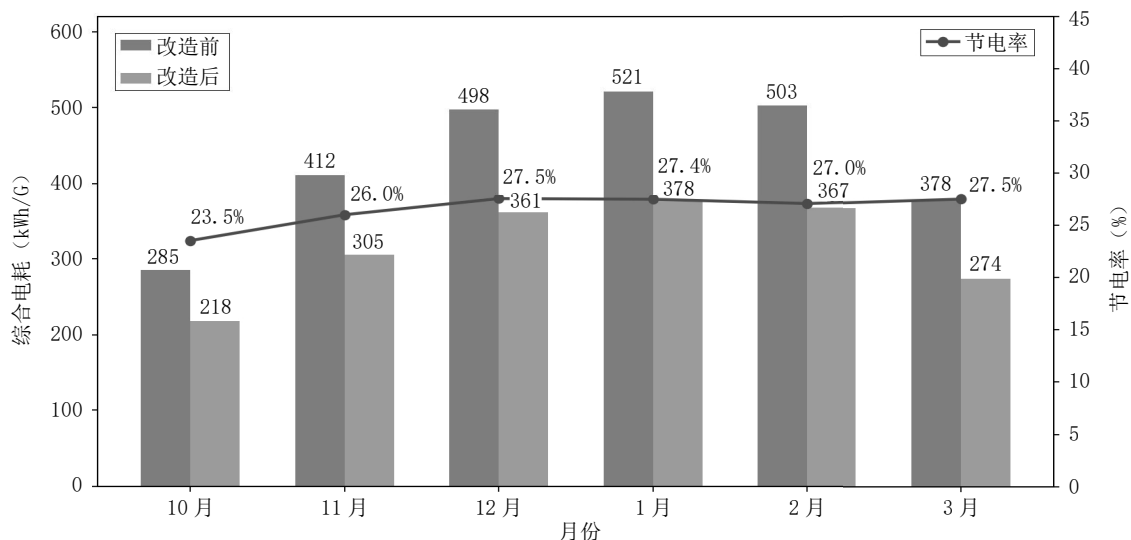


图 1 改造前后供暖季各月综合电耗及节电率对比

补偿模块在日温差超 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可提前 20 min ~ 30 min 预调, 避免室温大幅波动。SCADA 远程监控使运维人员从 6 人减至 3 人, 巡检工时降低约 62%, 人力成本下降。本项目静态投资回收期 2.5 年, 具有良好的推广价值。

5 结束语

本文以普通换热热力站作为研究对象, 构建 PLC 驱动的三级分布式自控体系, 整合供热计量动态计算、循环水泵变频调节以及供水温度改进 PID 策略, 构建集成化智能运行模式, 相关结论经由完整采暖季度现场测试得到验证。系统借助工业以太网与现场总线完成现场设备、控制单元及上层管理平台的数据交互, 对换热循环、水循环、补水压力调节等采暖环节实施闭环自动化管控, 整体性能符合工程应用要求。依托水泵相似理论搭建的定压差变频策略, 能够跟随即时热负荷改变水泵转速, 削减低负载阶段多余能耗, 采暖季平均节电水平为 27.4%。完成参数调试的 PID 温控策略可将二次网供水波动限制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 室内供暖

从图 1 可知, 改造后各月综合电耗显著下降。严寒期 (12 月—次年 1 月) 节电率约 27% ~ 28%, 因负荷率高、水泵转速较高; 初末寒期 (10 月、3 月) 节电率 23% ~ 26%。全季综合节电率 27.4%, 节省电量 18.6 万 kWh , 按 0.65 元 / kWh 计, 年节约电费约 12.1 万元, 投资回收期约 2.5 年。在供热质量方面, 室内温度合格率 ($\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$) 从 88.3% 提至 97.6%, 供水温度偏差超限事件由月均 14 次降至 2 次以内, 响应调节时间从 18 min 缩至约 6 min。MTBF 大于 4 320 h, 满足连续供热要求。气候

合格占比 97.6%, 缓解供热温度失衡问题。搭配气候补偿与逐时滚动负荷预估手段, 系统能够预判用热需求并调节供能强度, 为热力管网智能调度与精细运维提供技术及数据保障。

参考文献:

- [1] 贺平, 孙刚, 吴华新, 等. 供热工程 [M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 (GB 50736-2012) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 俞金寿, 蒋慰孙. 过程控制工程 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [4] 阮毅, 杨影, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [5] 吴彦廷, 陈昆, 刘浩晨, 等. 电力现货市场下的热电联产供热运行方式分析 [J]. 区域供热, 2026(01):9-16.
- [6] 冯彬, 高文生, 杨晓冬. 建筑桩基工程“降碳”技术路径探索 [J]. 岩土工程技术, 2026, 40(02):159-164.