

多热源联网条件下分区供热系统的协同调度与能效提升

常瑞峰

包头市热力(集团)有限责任公司 内蒙古 包头 014030

摘要: 多热源联网供热系统因其灵活性强、可靠性高、可再生能源消纳能力好等优势,逐渐成为大型城市供热网络的主流架构。然而,在多热源联网条件下,如何实现各热源与分区负荷之间的高效协同调度,仍是当前供热系统智能化升级中的关键难题。本文针对多热源联网分区供热系统,构建了以能效最大化为目标的协同调度优化模型,综合考虑热网水力工况、热源出力特性、用户负荷动态响应及管网输配损耗等因素,采用混合整数线性规划(MILP)方法进行求解,并结合某北方城市供热区域进行仿真验证。结果表明,所提协同调度策略可有效降低系统总能耗,减少一次能源消耗,同时提升可再生能源利用率,显著优于传统独立调度模式。本研究为多热源联网供热系统的智能调控与能效提升提供了理论支撑与工程实践路径。

关键词: 多热源联网; 分区供热; 协同调度; 能效优化; 混合整数线性规划; 智慧供热

引言

集中供热是我国北方地区冬季采暖的主要方式,承担着保障民生与节能减排的双重任务。据国家统计局数据,2024年我国集中供热面积已突破150亿平方米,年耗标煤量超过2亿吨。在“碳达峰、碳中和”国家战略驱动下,供热行业亟需从粗放式运行向精细化、智能化、低碳化转型。近年来,随着热电联产(CHP)、工业余热、地热、生物质锅炉、电锅炉及大型热泵等多种热源形式的接入,城市供热系统逐步由单一热源向多热源联网模式演进。这种转变不仅提升了系统冗余度与供能安全性,也为可再生能源的规模化利用提供了平台。然而,多热源并网也带来了调度复杂度剧增、水力失衡、热源竞争、能效波动等问题,尤其在分区管理的供热网络中,各子区域负荷特性差异显著,若缺乏全局协同机制,极易造成能源浪费与设备过载。因此,如何在保障供热质量的前提下,实现多热源与多分区之间的高效协同,已成为当前智慧供热领域亟待解决的核心问题。

1 系统架构与问题描述

1.1 多热源联网分区供热系统结构

典型多热源联网分区供热系统由多类型热源、主干与支状热网、分区换热站及用户侧终端组成。热源类型多元,有调节性受限但能效高的热电联产机组、启停灵活但碳排放高的燃气锅炉、依赖气象条件的大型水源热泵,还有具节能潜力的工业余热回收装置。这些热源经环状或枝状热网连接,形成覆盖多行政或地理分区的能源输送网。每个供热分区设一个或多个换热站,实现分区独立调控与计量^[1]。用户侧有住宅、商业综合体等多种类型,热负荷受多重因素影响,时空异质性显著。系统

常划分为若干供热分区,每区可由一个或多个热源供能,部分热源能跨区供能,形成复杂“多对多”供能关系,既为协同调度提供物理基础,也带来控制逻辑上的高度耦合性。

1.2 协同调度核心问题

多热源联网下,协同调度面临诸多技术挑战。一是要依实时或预测负荷,合理分配各热源供热量,让其高效运行,避免低效启停与偏离最佳工况。二是需动态调整各分区供回水温度与流量,既匹配用户热需求,又维持管网压力流量稳定。三是多个热源同时注水加压易引发水力失调,造成区域过流或欠流,影响供热质量与电能利用。四是能源转型背景下,要在保障安全舒适前提下,优先消纳可再生能源热源,减少化石能源依赖。五是调度方案要平衡运行成本、能耗、碳排放等多目标^[2]。传统调度多“各自为政”,缺乏全局视角,易致高品位能源过度使用、低品位闲置,整体能效难提升。

2 协同调度优化模型构建

2.1 目标函数

本文以系统日运行总能耗最小化为主要目标,同时引入可再生能源利用率作为辅助目标,构建多目标优化问题。为便于求解,采用加权法将其转化为单目标:

$$\min J = \omega_1 \cdot E_{\text{total}} - \omega_2 \cdot \eta_{\text{RE}}$$

其中:

E_{total} 为系统日总一次能源消耗(kWh);

η_{RE} 为可再生能源供热量占比;

ω_1, ω_2 为权重系数,满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$,可根据政策导向调整。

一次能源消耗计算考虑各热源的能源类型与转换效率:

$$E_{\text{total}} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{Q_{\text{CHP},t}}{\eta_{\text{CHP}}} \cdot \alpha_{\text{coal}} + Q_{\text{gas},t} \cdot \alpha_{\text{gas}} + Q_{\text{elec},t} \cdot \alpha_{\text{elec}} \right)$$

其中 Q 为供热量, η 为热效率, α 为一次能源折算系数(煤当量/kWh)。

2.2 决策变量

各热源在时段 t 的供热量 $Q_{i,t}$;

各分区换热站在时段 t 的一次侧流量 $m_{j,t}$ 与供水温度 $T_{s,j,t}$;
循环水泵频率/功率。

2.3 约束条件

2.3.1 热平衡约束

对每个分区 j , 有:

$$Q_{j,t} = \sum_{i \in S_j} Q_{i \rightarrow j,t} = c_p m_{j,t} (T_{s,j,t} - T_{r,j,t})$$

其中 S_j 为可向分区 j 供能的热源集合, $T_{r,j,t}$ 为回水温度。

2.3.2 热源出力约束

$$Q_{i,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,\max}, \forall i,t$$

$$|Q_{i,t} - Q_{i,t-1}| \leq R^{\text{up/down}}, (\text{爬坡率限制})$$

2.3.3 管网水力约束 (简化模型)

采用线性化压降-流量关系:

$$\Delta p_{k,t} = a_k m_{k,t} + b_k, \forall k \in \text{管道}$$

系统总扬程需满足:

$$H_{\text{pump},t} \geq \max_k \Delta p_{k,t}$$

水泵功率:

$$P_{\text{pump},t} = \frac{\rho g H_{\text{pump},t} M_t}{\eta_{\text{pump}}}$$

其中 M_t 为总流量, η_{pump} 为泵效。

2.3.4 用户舒适度约束

室内温度需满足:

$$T_{\text{in},j,t} \geq T_{\text{set}} - \Delta T_{\text{tol}}, \forall j$$

通过热负荷模型关联供水参数与室温:

$$Q_{j,t} = K_j (T_{\text{in},j,t} - T_{\text{out},t})$$

其中 K_j 为建筑热损失系数, $T_{\text{out},t}$ 为室外温度。

2.3.5 可再生能源优先约束

对余热、热泵等可再生热源, 设定最小出力比例:

$$Q_{\text{RE},t} \geq \beta \cdot Q_{\text{total},t}$$

2.4 模型求解方法

由于目标函数与部分约束为非线性, 本文采用分段线性化技术 (Piecewise Linearization) 将非线性项 (如水泵功率、热效率曲线) 近似为线性表达, 并引入0-1变量处理启停逻辑, 最终形成混合整数线性规划 (MILP) 模型, 利用Gurobi或CPLEX求解器进行高效求解。

3 案例分析

3.1 案例概况

选取我国华北某城市一个典型供热区域作为研究对象。该区域面积约25km², 划分为3个供热分区 (A、B、C), 总供热面积850万m²。系统接入4类热源:

热电联产机组 (CHP): 最大出力200MW, 位于分区A;

燃气锅炉房: 150MW, 位于分区B;

工业余热回收站: 80MW (可调范围50-80MW), 位于分区C;

大型水源热泵站: 60MW (COP = 3.5), 位于主干网中部, 可向三区供能。

气象数据采用2024年1月典型寒潮日 (室外温度-12°C至-5°C), 负荷预测基于历史数据与机器学习模型生成。

3.2 对比方案设计

方案1 (基准): 各分区独立调度, 热源仅服务本区, 无跨区协同;

方案2 (本文方法): 实施多热源联网协同调度, 优化热源分配与管网参数。

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 热源出力对比

如表1所示, 在协同调度下, 热泵与余热出力显著提升, CHP与燃气锅炉出力相应减少。

表1: 热源出力对比

热源类型	方案1出力 (MWh)	方案2出力 (MWh)	变化率
CHP	1850	1620	-12.4%
燃气锅炉	1320	1100	-16.7%
工业余热	680	780	+14.7%
热泵	420	580	+38.1%

3.3.2 能效指标对比

表2: 能效指标对比

指标	方案1	方案2	提升幅度
日总一次能源消耗 (tce)	1825	1647	-9.7%
系统综合能效 (%)	82.3	91.6	+11.3%
可再生能源利用率	28.5%	44.1%	+15.6%
循环泵总电耗 (kWh)	24,800	21,750	-12.3%

3.3.3 水力工况改善

协同调度通过优化流量分配, 使各支路压差标准差由18.6kPa降至9.2kPa, 显著缓解水力失调, 末端用户室温达标率从89%提升至97%。

3.3.4 碳排放分析

按电网排放因子0.581kgCO₂/kWh、天然气2.16kgCO₂/m³计算, 方案2日减碳量达126吨, 年化减碳约4.6万吨。

4 讨论

4.1 协同调度的关键机制

本研究揭示了多热源联网协同调度的三大核心机制：

(1) 热源互补机制：高调节性热源（如电锅炉、热泵）补偿CHP的刚性出力，提升系统灵活性；(2) 空间负荷转移机制：通过管网互联，将富余热能从低负荷区调配至高负荷区，减少局部过供；(3) 能级匹配机制：优先使用低温热源（如余热、热泵）满足基础负荷，高品位能源用于调峰，实现“温度对口、梯级利用”^[3]。

4.2 实施挑战与对策

尽管协同调度在理论上优势明显，但在工程落地过程中仍面临若干现实挑战。首先是数据壁垒问题，不同热源往往由不同企业运营，数据标准不一且存在商业保密顾虑，导致全局优化所需的信息难以获取。对此，建议构建由政府或第三方主导的统一数据平台，并探索联邦学习等隐私计算技术，在保护各方数据主权的前提下实现协同优化。其次是控制延迟问题，热网具有显著的热惯性，从调节指令发出到用户端产生响应存在数小时滞后，影响实时调度效果。可结合模型预测控制（MPC）进行滚动优化，并利用数字孪生技术对调度方案进行仿真预演，提前规避潜在风险。最后是初期投资成本较高，需对阀门、传感器、通信系统等进行改造升级。可通过合同能源管理（EMC）等市场化机制，由节能服务公司垫资建设，以未来节能收益分期偿还，降低用户资金压力。

4.3 政策建议

为加速协同调度技术的推广应用，亟需配套的政策支持。首先，应将多热源协同调度能力纳入《智慧供热系统建设导则》等技术标准，明确其在新建或改造项目中的强制性或推荐性要求。其次，对可再生能源供热量实施差异化补贴或发放绿色热力证书，通过经济激励引导运营主体主动优化调度策略。最后，推动供热特许经营区域的适度整合，打破因行政区划分割造成的“热源

孤岛”，为跨区协同提供制度保障。唯有技术、市场与政策三者协同发力，方能真正释放多热源联网系统的巨大节能潜力^[4]。

5 结语

本文针对多热源联网条件下分区供热系统的协同调度问题，构建了融合热源、管网与用户侧的集成优化模型，并通过实际案例验证了其在能效提升、碳减排与运行稳定性方面的显著效果。这些效益的实现，源于热源互补、空间负荷转移与能级匹配三大核心机制的协同作用。此外，优化后的管网水力工况显著改善了末端供热质量，用户舒适度与系统可靠性同步提升。本方法具备良好的工程可实施性，可为大型城市供热系统从“分散控制”向“全局优化”转型提供可靠技术范式。未来研究将拓展至热-电-气多能耦合系统协同优化，并探索人工智能驱动的自适应调度算法，进一步提升系统韧性与自主决策能力。

参考文献

- [1] 乔帆,王海,杨光.多热源环状供热系统的管网水力计算分区方法[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司,《煤气与热力》杂志社有限公司,中国建设科技集团股份有限公司.2022供热工程建设与高效运行研讨会论文集.同济大学机械与能源工程学院;,2022:206-212.
- [2] 翟炯.供热系统分区分时优化研究[D].河北建筑工程学院,2024.
- [3] 刘哲.供热管网分时分区动态节能调控方法研究[J].科学技术创新,2025,(22):135-138.
- [4] 狄丰伟,梁兵兵.供热系统分时分区节能应用[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司,《煤气与热力》杂志社有限公司,中国建设科技集团股份有限公司.2022供热工程建设与高效运行研讨会论文集.临汾市热力供应有限公司;,2022:530-536.