

考虑风电消纳的电热联合系统优化调度模型

徐小圣, 徐昌睿, 李梦诗, 季天瑶

(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 电热联合系统能够有效整合电能和热能, 具有显著的能源利用优势。为了分析电热联合调度的经济节能效果, 在分时电价以及负荷波动的条件下, 建立了包含风电场、能源集线器(energy hub, EH)、热泵和蓄热罐的电热联合系统优化调度模型。电热联合系统以日运行成本最小为目标, 考虑了稳态电热联合潮流、储能设备动态特性、管道温度降方程等实际约束条件。为提高优化效率, 采用方程线性化和分段 McCormick 凸包络技术处理约束中的非线性项, 将原本的非凸优化问题转化为混合整数二次规划(mixed integer quadratic programming, MIQP)问题求解。通过算例分析验证了所提模型的有效性, 在 4 种场景下比较了风电制热以及热网传输损耗对系统日运行成本和弃风量的影响, 并确定了风电场接入热网的最佳节点。结果表明, 电热联合系统能够将不稳定的风能转化为稳定的热能, 从而有效提升风电消纳空间和系统经济效益。

关键词: 电热联合调度; 混合整数二次规划; 风电消纳; 能源集线器; 储能设备

Optimization Dispatching Model of the Combined Heat and Power System Considering Wind Power Integration

XU Xiaosheng, XU Changrui, LI Mengshi, JI Tianyao

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The combined heat and power system effectively integrates electricity and heat energy, providing significant advantages in energy utilization. To analyze the economic and energy-saving effects of combined heat and power dispatch, an optimization dispatch model is developed considering time-of-use electricity prices and load fluctuations, which includes wind farm, energy hub, heat pump, and heat storage tank. The optimization objective is to minimize daily operating costs while considering practical constraints such as steady-state combined electrical and thermal power flow, dynamic characteristics of energy storage device, and pipe temperature drop equations. To enhance optimization efficiency, equation linearization and piecewise McCormick convex envelope technique are utilized, transforming the original non-convex optimization problem into a mixed integer quadratic programming (MIQP) problem. The proposed model's validity is verified through case studies, comparing the impact of wind-to-heat conversion and heat transfer loss on daily operating costs and wind curtailment in four scenarios. The optimal connection node for integrating the wind farm into the heating network was also identified. The results demonstrate the system's capability to convert unstable wind energy into stable heat energy, thereby enhancing wind energy integration capacity and improving overall economic performance.

Key words: combined heat and power dispatch; mixed integer quadratic programming; wind power consumption; energy hub; energy storage device

0 引言

近年来, 电热联合系统作为一种集电力生产、热能生产和热力供应为一体的能源系统, 受到了广

泛的关注。随着能源集线器(energy hub, EH)的使用和发展^[1-2], 不同能源系统之间的相互依赖性得到增强, 对于提高综合能源系统的稳定性、效率和可靠性具有重要意义。大量研究表明, 电热联合系统可以充分协调能源的生产和消费, 同时提升可再生能源的消纳空间^[3-4]。鉴于此, 如何有效地对电热联合系统进行优化调度, 使其在保证能源供应和需求平衡的同时最大化其经济效益和环境效益, 成

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51437006)。

Foundation item: Supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (51437006).

为了研究的热点问题。

目前, 对电热联合系统优化调度的研究主要围绕着如何提高能源利用效率、降低能源消耗和保证系统稳定性和经济性进行。文献[5]采用分解协调算法求解电热联合系统优化调度问题, 能有效提高复杂能源系统的计算效率。文献[6]采用 Benders 分解算法, 通过建立极限消纳风电的储热放热速率与电锅炉电功率的协调模型, 实现了电热联合系统的最优运行。文献[7]开发了分解法和综合电-热-液计算技术两种方法研究电力和热网络作为一个整体的性能, 结果表明综合法比分解法所需的迭代次数更少。文献[8]提出一种考虑风电消纳和综合需求响应的电热联合系统优化运行方法, 有效提升了风电消纳空间和系统经济效益。除上述传统数学规划方法, 启发式算法也被用于解决电热联合系统的调度问题, 以确定各种能源资源的最优配置。文献[9]建立了含储热的电热联合系统优化调度模型, 并利用改进的遗传算法求解。还有的文献采用粒子群算法^[10]、群搜索算法^[11]、灰狼优化算法^[12]等求解电热联合系统优化调度问题。

上述文献为电热联合系统的优化调度问题奠定了基础, 但由于所建立的模型都具有一定的非凸特性, 因此计算较为复杂。尤其是在采用启发式算法时, 随着系统规模的增大易出现局部最优且难以收敛的情况^[13]。因此, 有学者提出采用约束线性化的方法提高电热联合系统调度策略的效率和精确性。文献[14]采用方程线性化的方法建立电热联合微网的混合整数线性规划模型, 但对电热系统模型的描述较为简单, 没有考虑热网节点流量混合、管道温度降方程等实际约束, 且缺乏对风电消纳过程的研究。文献[15]利用强对偶理论和重拟线性化技术对所园区级电热气综合能源系统的非凸模型进行线性化处理, 但忽略了电热系统的潮流约束。文献[16]研究了基于混合整数锥规划的电热联合系统经济调度问题, 对热网部分的水力和热力模型都进行了详细的建模, 但电网部分仅采用简化的直流潮流模型, 所得结果的经济性和安全性得不到保障。文献[17]通过简化热网模型、引入 0-1 变量以及大 M 法减少电热综合能源系统优化调度模型中的非线性项, 处理后的模型仍含有电网交流潮流约束为非线性项, 且对热网建模采用质调节模型, 降低了电热联合调度的灵活性。

针对热力系统模型中的双线性项, 目前主要有两种处理方法, 一种是采用历史数据在线生成调度策略的数据驱动方法^[18-19], 但存在不具备可解释性和可靠性的问题^[20]; 另一种是对模型中的双线性项进行松弛, 这种方法可以保证非凸问题的全局最优解, 并且降低了计算的复杂度。其中, McCormick 凸包络技术是一种典型的凸松弛方法^[21-22]。文献[23]采用 McCormick 凸包络对分布式电源的实际出力进行近似线性化, 构建了主动配电网分布式电源规划的混合整数线性规划模型。文献[24]提出一种双层分支定界方法求解具有禁止调度区域和网络损耗的电力系统经济调度模型, 并利用 McCormick 凸松弛技术将其转化为混合整数二次规划 (mixed integer quadratic programming, MIQP) 问题进行求解。上述文献证明了 McCormick 凸松弛技术在电力系统中的应用潜力, 但有关热力系统模型中的双线性项研究相对较少, 且精确度有待进一步提高。

鉴于此, 本文构建了计及电热联合潮流、蓄热罐动态运行特性以及含风电制热和能源集线器的电热联合系统优化调度模型。在建模方面, 考虑了电力系统交流潮流约束以及热力系统完整的水力-热力过程, 并对跨小时的动态约束如储能配置、机组爬坡等进行了详细建模, 提高了模型的准确性和实用性; 在求解方面, 针对电力系统支路首末端潮流方程进行线性化近似, 将高度非凸的节点功率平衡方程解耦为由线路功率流和损耗流构成的全线性约束。同时, 采用分段 McCormick 凸松弛技术处理热力系统中由流量和温度的乘积所构成的双线性变量, 将原非凸模型转化为 MIQP 进行求解。所提方法无需进行迭代, 从而减少了优化时间和计算复杂度; 在运行优化方面, 提出了一种利用电网弃风进行制热的策略, 并通过能源集线器协调各种不同形式的能量, 这种策略使得多种能源可以在分时电价以及负荷波动情况下实现跨时空的协调, 从而优化系统的运行效果。通过 CPLEX 求解器对所提模型进行求解, 并对不同场景下系统的运行成本和风电消纳情况进行了比较。结果表明, 电热联合系统具有十分显著的经济效益和风电消纳能力。

1 电热联合系统结构图

本文研究的电热联合系统如图 1 所示, 电力系统和热力系统之间通过能源集线器、风电场、热泵

和蓄热罐等设备进行耦合。能源集线器是电热综合能源系统的中心，用来控制和优化多种能量源和使用设备之间的能源流动，热负荷主要通过能源集线器生产的热能来满足。风电场在电力系统稳态建模过程中通常被视为 PQ 节点，与热泵进行配合时，能够将谷时段的弃风电量转化成热量对热力系统进行供热。与此同时，利用蓄热罐的动态特性可以实现能源的跨时段协调，进一步提高能源的利用效率。当热泵和能源集线器制热较多而热负荷需求较小时蓄热罐存储热量；当热泵和能源集线器制热较少而热负荷需求较大时蓄热罐释放热量。

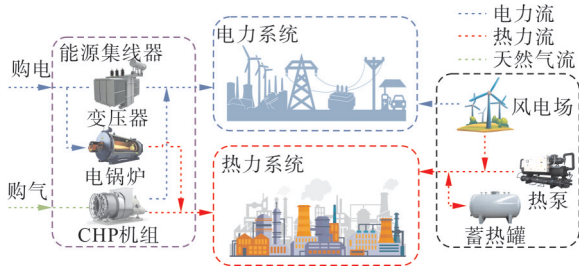


图 1 电热联合系统结构图

Fig. 1 Structure of combined heat and power system

综上所述，区域电热系统联合运行能够很好地协调电能、热能和可再生能源，利用弃风制热可以减少能源浪费，提高风轮和发电机等设备的整体使用效率。除此之外，热力系统还可以看作电力系统附带的一种大型储能设备，这打破了电力系统原本的平衡限制，有助于提高可再生能源的消纳空间。目前，区域电热联合系统优化调度的基本要求主要分为以下三点：1) 电、热系统潮流在每个时段内都要达到平衡；2) 需要考虑系统各设备的运行约束，尤其是跨时段的动态约束；3) 所建模型应简单有效，能适应实际应用中不同规模系统的在线调度问题。

2 电热联合系统混合整数规划模型

2.1 目标函数

系统总运行成本由能源集线器的购电、购气成本和常规发电机组的运行成本构成，表示如下：

$$\min f = f_1 + f_2 \quad (1)$$

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} a_{0,i} + a_{1,i} \times P_{i,t}^G + a_{2,i} (P_{i,t}^G)^2 \quad (2)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{EH}} C_{elec,t} F_{i,t}^E + C_{gas,t} F_{i,t}^G \quad (3)$$

式中： $P_{i,t}^G$ 为第 i 台发电机在 t 时段的有功出力； $a_{0,i}$ 、 $a_{1,i}$ 和 $a_{2,i}$ 为发电机的耗量特征曲线参数； $C_{elec,t}$ 和 $C_{gas,t}$ 为 t 时段的分时电价、气价； $F_{i,t}^E$ 和 $F_{i,t}^G$ 分别为第 i 台能源集线器在 t 时段的购电量、购气量； N_G 和 N_{EH} 分别为常规发电机组和能源集线器的索引集合； T 为系统优化调度周期，设为 24 h，其中单个调度时段为 1 h；此外，本文假设风电场作为清洁能源不产生成本，因此电热联合系统将尽可能多地消纳风电^[25]。

2.2 电力系统模型及其线性化

2.2.1 支路潮流方程

设 i 和 j 为支路 l 的首、末端节点，忽略节点对地导纳，则支路首末两端的潮流计算公式为：

$$\begin{cases} P_{ij,t}^{from} = g_{ij}(U_{i,t}^2 - U_{i,t}U_{j,t}\cos\delta_{ij,t}) - b_{ij}U_{i,t}U_{j,t}\sin\delta_{ij,t} \\ Q_{ij,t}^{from} = -b_{ij}(U_{i,t}^2 - U_{i,t}U_{j,t}\cos\delta_{ij,t}) - g_{ij}U_{i,t}U_{j,t}\sin\delta_{ij,t} \\ P_{ij,t}^{to} = -g_{ij}(U_{i,t}^2 - U_{i,t}U_{j,t}\cos\delta_{ij,t}) - b_{ij}U_{i,t}U_{j,t}\sin\delta_{ij,t} \\ Q_{ij,t}^{to} = b_{ij}(U_{i,t}^2 - U_{i,t}U_{j,t}\cos\delta_{ij,t}) - g_{ij}U_{i,t}U_{j,t}\sin\delta_{ij,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_{ij,t}^{from}$ 、 $Q_{ij,t}^{from}$ 、 $P_{ij,t}^{to}$ 、 $Q_{ij,t}^{to}$ 分别为 t 时段支路 ij 的首末端有功、无功功率； $U_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 处的电压幅值； $\delta_{ij,t}$ 为 t 时段节点 i 和 j 之间的电压相角差； g_{ij} 和 b_{ij} 分别为支路 ij 的电导、电纳。

则支路有功和无功功率损耗可表示为：

$$P_{ij,t}^{loss} = P_{ij,t}^{from} - P_{ij,t}^{to} \quad (5)$$

$$Q_{ij,t}^{loss} = Q_{ij,t}^{from} - Q_{ij,t}^{to} \quad (6)$$

下面对电力系统支路首末两端的有功、无功功率分别进行线性化。首先，指定节点电压和相位的初始值 ($U_i^{(0)}$ 、 $\delta_i^{(0)}$)，然后对式 (4) 中的三角函数项 $\sin\delta_{ij,t}$ 、 $\cos\delta_{ij,t}$ 以及非线性项 $U_{i,t}U_{j,t}\delta_{ij,t}$ 进行一阶 Taylor 展开，如下所示。

$$\sin\delta_{ij,t} \approx k_{ij,t}^{(s)}\delta_{ij,t} + m_{ij,t}^{(s)}, \cos\delta_{ij,t} \approx k_{ij,t}^{(c)}\delta_{ij,t} + m_{ij,t}^{(c)} \quad (7)$$

$$U_{i,t}U_{j,t}\delta_{ij,t} \approx U_{i,t}^{(0)}U_{j,t}^{(0)}\delta_{ij,t} + U_{i,t}U_{j,t}\delta_{ij,t}^{(0)} - U_{i,t}^{(0)}U_{j,t}^{(0)}\delta_{ij,t}^{(0)} \quad (8)$$

式中 $k_{ij,t}^{(s)}$ 、 $m_{ij,t}^{(s)}$ 、 $k_{ij,t}^{(c)}$ 、 $m_{ij,t}^{(c)}$ 分别为正余弦展开项的一次项系数和常数项。

其次，将节点电压的平方视为独立变量，则非线性项 $U_{i,t}U_{j,t}$ 可进一步转化为 $(U_{ij,t} = U_{i,t} - U_{j,t})$ 。

$$U_{i,t}U_{j,t} = \frac{U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2}{2} - \frac{U_{ij,t}^2}{2} \quad (9)$$

最后，将式 (7) — (9) 代入式 (4) 中，可得支路潮流方程的线性形式，这里以支路首端功率 $P_{ij,t}^{from}$ 为例，给出线性化结果如式 (10) 所示。

$$P_{ij,t}^{\text{from}} = g_{ij} U_{i,t}^2 - \lambda_{ij,t}^{\text{P, from}} \frac{U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2}{2} - \mu_{ij,t}^{\text{P, from}} (\delta_{ij,t} - \delta_{ij,t}^{(0)}) + \frac{1}{2} \lambda_{ij,t}^{\text{P, from}} U_{ij,t}^2 \quad (10)$$

式中:

$$U_{ij,t}^2 \approx \frac{U_{i,t}^{(0)} - U_{j,t}^{(0)}}{U_{i,t}^{(0)} + U_{j,t}^{(0)}} (U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2) \quad (11)$$

式中 $\lambda_{ij,t}^{\text{P, from}}$ 、 $\mu_{ij,t}^{\text{P, from}}$ 为优化过程中的参数, 表达式为:

$$\lambda_{ij,t}^{\text{P, from}} = (g_{ij} m_{ij,t}^{(c)} + b_{ij} m_{ij,t}^{(s)}) + (g_{ij} k_{ij,t}^{(c)} + b_{ij} k_{ij,t}^{(s)}) \delta_{ij,t}^{(0)} \quad (12)$$

$$\mu_{ij,t}^{\text{P, from}} = (g_{ij} k_{ij,t}^{(c)} + b_{ij} k_{ij,t}^{(s)}) U_{i,t}^{(0)} U_{j,t}^{(0)} \quad (13)$$

2.2.2 节点功率平衡方程

基于上述定义, 将节点功率平衡方程解耦为支路功率流和支路损耗流的形式^[26]。

$$P_{i,t}^{\text{W}} + P_{i,t}^{\text{EH}} + P_{i,t}^{\text{G}} - P_{i,t}^{\text{LD}} = \sum_{l \in i} a_{il} P_{l,t}^{\text{from}} + \sum_{l \in i} b_{il} P_{l,t}^{\text{loss}} \quad (14)$$

$$Q_{i,t}^{\text{G}} + Q_{i,t}^{\text{W}} - Q_{i,t}^{\text{LD}} = \sum_{l \in i} a_{il} Q_{l,t}^{\text{from}} + \sum_{l \in i} b_{il} Q_{l,t}^{\text{loss}} \quad (15)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{W}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{EH}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{G}}$ 分别为 t 时段节点 i 处风电场、能源集线器和常规发电机组的有功出力; $Q_{i,t}^{\text{W}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{G}}$ 分别为 t 时段节点 i 处风电场和常规发电机组的无功出力; $P_{i,t}^{\text{LD}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{LD}}$ 分别为 t 时段节点 i 处的有功和无功电负荷; a_{il} 为节点-支路首端功率关联矩阵 $\mathbf{A} (N_{\text{bus}} \times N_{\text{branch}})$ 中的元素, 当节点 i 为支路 l 首节点时对应元素为 1, 当节点 i 为支路 l 末节点时对应元素为 -1, 否则为 0; b_{il} 为节点-支路损耗功率关联矩阵 $\mathbf{B} (N_{\text{bus}} \times N_{\text{branch}})$ 中的元素, 当节点 i 为支路 l 末节点时对应元素为 1, 否则为 0; N_{bus} 、 N_{branch} 分别为电力系统中节点和支路的索引集合; $l \in i$ 表示所有与节点 i 相连的支路。

2.2.3 支路功率约束

支路功率约束由各支路首端功率的平方项构成, 可视为功率平面上的圆形区域, 表示如下。

$$(P_{ij,t}^{\text{from}})^2 + (Q_{ij,t}^{\text{from}})^2 \leq (S_{ij}^{\text{max}})^2 \quad (16)$$

式中 S_{ij}^{max} 为支路传输功率的容量上限。

针对支路功率约束含有的二次项, 本文提出基于切线的圆形区域线性化方法, 将支路功率约束所表示的凸区域用一组切线围成的多边形区域近似表示。设相邻切线之间的角度为 α , 在圆周上共能做出 $N_l = 360^\circ / \alpha$ 条切线, 则支路功率约束可转化为如下所示的线性约束。

$$\sin \theta \times P_{ij,t}^{\text{from}} + \cos \theta \times Q_{ij,t}^{\text{from}} \leq S_{ij}^{\text{max}} \quad (17)$$

式中:

$$\theta = (k - 1)\alpha, k = 1, 2, \dots, N_l \quad (18)$$

随着所作切线条数 N_l 的增加, 该方法可以在保证支路功率不越限的前提下最大限度地近似上述圆形区域。在本文中取 $\alpha = 45^\circ$ 。

2.2.4 常规发电机组功率约束

$$\begin{cases} P_i^{\text{G, min}} \leq P_{i,t}^{\text{G}} \leq P_i^{\text{G, max}} \\ Q_i^{\text{G, min}} \leq Q_{i,t}^{\text{G}} \leq Q_i^{\text{G, max}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_i^{\text{G, min}}$ 、 $P_i^{\text{G, max}}$ 、 $Q_i^{\text{G, min}}$ 、 $Q_i^{\text{G, max}}$ 分别为发电机 i 有功和无功出力的上下限。

2.2.5 常规发电机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{G}} - P_{i,t-1}^{\text{G}} \leq P_i^{\text{G, ramp}} \\ P_{i,t-1}^{\text{G}} - P_{i,t}^{\text{G}} \leq P_i^{\text{G, ramp}} \end{cases} \quad (20)$$

式中 $P_i^{\text{G, ramp}}$ 为发电机 i 的爬坡功率限制。不同类型的发电机组爬坡速率也不同, 其中水电机组是最快的, 每分钟的爬坡功率可以达到额定功率的 50%~100%; 燃气机组也比较快, 可以达到额定功率的 20%; 联合循环和汽轮机的热效率高, 但爬坡功率较低, 一般只有 2%~5%^[27]。

2.2.6 节点电压幅值约束

$$(U_i^{\text{min}})^2 \leq U_{i,t}^2 \leq (U_i^{\text{max}})^2 \quad (21)$$

式中 U_i^{min} 和 U_i^{max} 分别为节点 i 的爬坡功率下限和上限。

2.3 热力系统模型及其线性化

2.3.1 节点热功率平衡方程

为获得更高的经济效率和灵活性, 热力系统采用温度和流量两者并调的辐射状网络, 其中节点热功率平衡方程可表示为:

$$H_{i,t}^{\text{EH}} + H_{i,t}^{\text{HP}} - H_{i,t}^{\text{LD}} + C_p \sum_{j \in \text{In}(i)} M_{ji,t} T_{ji,t} = C_p \sum_{k \in \text{Out}(i)} M_{ik,t} T_{i,t} \quad (22)$$

式中: $H_{i,t}^{\text{EH}}$ 、 $H_{i,t}^{\text{HP}}$ 分别为 t 时段节点 i 处 EH 和热泵的产热量; $H_{i,t}^{\text{LD}}$ 为 t 时段节点 i 处的热负荷; $M_{ji,t}$ 为 t 时段管道 ji 中热媒的流量; $T_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的出口温度; $T_{ji,t}$ 为 t 时段管道 ji 的出口温度; C_p 为水的比热容, 取为 $4.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $\text{In}(i)$ 、 $\text{Out}(i)$ 分别为热网中流入和流出节点 i 的节点索引集合。

为了处理节点热功率平衡方程中由管道流量和出口温度的乘积构成的双线性项“MT”, 定义乘积项 $\Omega_{ji,t}^{\text{pipe}} = C_p M_{ji,t} T_{ji,t}$ 、 $\Omega_{ik,t}^{\text{node}} = C_p M_{ik,t} T_{i,t}$, 则式(22)可转化为以下形式^[28]。

$$H_{i,t}^{EH} + H_{i,t}^{HP} - H_{i,t}^{LD} + \sum_{j \in \text{In}(i)} \Omega_{ji,t}^{\text{pipe}} = \sum_{k \in \text{Out}(i)} \Omega_{ik,t}^{\text{node}} \quad (23)$$

2.3.2 管道温度降方程

热媒在管道内流动时会与管道壁面发生摩擦,造成一定的热量损耗,这一过程可用管道温度降方程(苏霍夫温降公式)进行描述^[29]。

$$T_{ji,t} = (T_{j,t} - T_a) \exp\left(-\frac{\nu_{ji} L_{ji}}{C_p M_{ji,t}}\right) + T_a \quad (24)$$

式中: ν_{ji} 为管道 ji 单位长度的传热系数; L_{ji} 为管道 ji 的长度; T_a 为环境温度。

在实际生产中,管道的传热系数 ν_{ji} 通常小于 $0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 因此不妨假设 $\nu_{ji} L_{ji} \ll C_p M_{ji}$ ^[30]。基于这一假设管道温度降方程可用一阶 Taylor 展开线性化近似为:

$$\Omega_{ji,t}^{\text{pipe}} \approx \Omega_{ik,t}^{\text{node}} - \nu_{ji} L_{ji} (T_{j,t} - T_a) \quad (25)$$

2.3.3 节点流量连续性方程

在各个时段,流入和流出节点的管道质量流量之和相等,用公式表示为:

$$\sum_{j \in \text{In}(i)} M_{ji,t} = \sum_{k \in \text{Out}(i)} M_{ik,t} \quad (26)$$

2.3.4 热泵及蓄热罐约束

$$H_i^{\text{HP}, \min} \leq H_i^{\text{HP}, t} \leq H_i^{\text{HP}, \max} \quad (27)$$

$$0 \leq L_{i,0}^{\text{HS}} + \sum_{t'=1}^t (u_{i,t'}^{\text{ch}} - u_{i,t'}^{\text{dis}}) \times L_{i,t'}^{\text{HS}} \leq L_i^{\text{HS}, \max} \quad (28)$$

$$u_{i,t'}^{\text{ch}} + u_{i,t'}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (u_{i,t'}^{\text{ch}}, u_{i,t'}^{\text{dis}} = 0 \text{ or } 1) \quad (29)$$

式中: $H_i^{\text{HP}, \min}$ 、 $H_i^{\text{HP}, \max}$ 分别为第 i 台热泵产热量的上下限; $L_{i,0}^{\text{HS}}$ 、 $L_{i,t'}^{\text{HS}}$ 分别为蓄热罐 i 在初始时刻和 t' 时段的储能量; $L_i^{\text{HS}, \max}$ 为蓄热罐 i 的最大储能量; $u_{i,t'}^{\text{ch}}$ 、 $u_{i,t'}^{\text{dis}}$ 分别表示蓄热罐 i 在 t' 时段的充放热状态,且同一时刻两种状态不能同时发生。

2.3.5 热力系统运行约束

除上述约束外,热力系统安全稳定运行还需满足一定的限制,包括乘积项约束、出口温度约束和管道流量约束等,用公式表示如下。

$$C_p M_{ji,t} T_{ji}^{\min} \leq \Omega_{ji,t}^{\text{pipe}} \leq C_p M_{ji,t} T_{ji}^{\max} \quad (30)$$

$$C_p M_{ik,t} T_i^{\min} \leq \Omega_{ik,t}^{\text{node}} \leq C_p M_{ik,t} T_i^{\max} \quad (31)$$

$$T_i^{\min} \leq T_{i,t} \leq T_i^{\max} \quad (32)$$

$$T_{ji}^{\min} \leq T_{ji,t} \leq T_{ji}^{\max} \quad (33)$$

$$M_{ji}^{\min} \leq M_{ji,t} \leq M_{ji}^{\max} \quad (34)$$

式中: $T_{ji}^{\min}$ 和 $T_{ji}^{\max}$ 分别为管道 ji 出口温度的最小值和最大值; $T_i^{\min}$ 和 $T_i^{\max}$ 分别为节点 i 出口温度的最小值和最大值; $M_{ji}^{\min}$ 和 $M_{ji}^{\max}$ 分别为管道 ji 中热媒流量

的最小值和最大值。

2.3.6 分段 McCormick 凸松弛方法

在上述热力系统的约束中,若采用乘积项 $\Omega_{ji,t}^{\text{pipe}}$ 完全替代管道出口温度变量 $T_{ji,t}$,则除了乘积项 $\Omega_{ik,t}^{\text{node}} = C_p M_{ik,t} T_{i,t}$ 中仍含有双线性项外,其余的约束都是线性的。本文采用分段 McCormick 凸包络方法处理该双线性约束,相较于传统的 McCormick 凸包络方法,分段法能构造出双线性变量更紧的上下界,从而提高凸松弛的性能^[22]。如图 2 所示,双线性项中一个变量的取值被划分为若干个不相交的区域,通过优化区域选择变量,确定最优区域,从而缩小被划分变量的可行域。不失一般性,设热力系统节点供热温度的取值为 $95^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$,管道流量上限为 250 kg/s ,管道流量的变化范围远大于供热温度^[5]。因此本文选择对节点温度进行划分,能够在更少的分区数内收紧分段 McCormick 凸包络的边界。

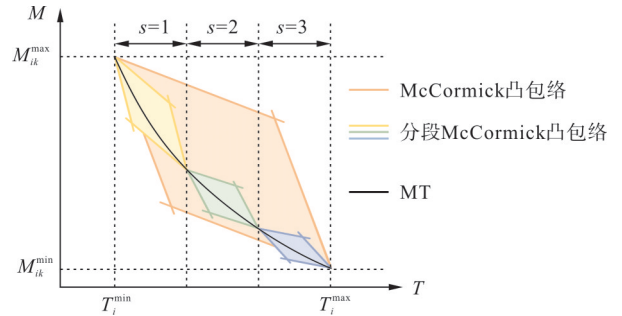


图 2 分段 McCormick 凸包络示意图

Fig. 2 Illustration of the piecewise McCormick envelopes method

采用分段 McCormick 凸包络技术可将乘积项 $\Omega_{ik,t}^{\text{node}} = C_p M_{ik,t} T_{i,t}$ 表示的双线性约束转化为一个凸域,用公式表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{ik,t}^{\text{pipe}} \leq C_p \sum_{s=1}^{N_s} (M_{ik}^{\min} T_{i,t,s} + M_{ik,t,s} T_{i,s}^{\max} - M_{ik}^{\min} T_{i,s}^{\max} y_{i,t,s}) \\ \Omega_{ik,t}^{\text{pipe}} \leq C_p \sum_{s=1}^{N_s} (M_{ik}^{\max} T_{i,t,s} + M_{ik,t,s} T_{i,s}^{\min} - M_{ik}^{\max} T_{i,s}^{\min} y_{i,t,s}) \\ \Omega_{ik,t}^{\text{pipe}} \geq C_p \sum_{s=1}^{N_s} (M_{ik}^{\max} T_{i,t,s} + M_{ik,t,s} T_{i,s}^{\max} - M_{ik}^{\max} T_{i,s}^{\max} y_{i,t,s}) \\ \Omega_{ik,t}^{\text{pipe}} \geq C_p \sum_{s=1}^{N_s} (M_{ik}^{\min} T_{i,t,s} + M_{ik,t,s} T_{i,s}^{\min} - M_{ik}^{\min} T_{i,s}^{\min} y_{i,t,s}) \end{array} \right. \quad (35)$$

式中 $T_{i,s}^{\max}$ 、 $T_{i,s}^{\min}$ 分别为分区 s 中变量 $T_{i,t}$ 的上下限。将 0-1 整数变量 $y_{i,t,s}$ 分配给各个分区 s ,若 $T_{i,t}$ 的值

属于分区 s , 则 $y_{i,t,s} = 1$, 否则 $y_{i,t,s} = 0$; 同理, 变量 $M_{ik,t}$ 也被分解为 $M_{ik,t,s}, \forall s \in N_s$; 其中, N_s 为 s 的索引集合。

为了限制只有一个分区的双线性变量不为 0, 还需添加约束式 (36)–(41)。如果 0–1 整数变量 $y_{i,t,s} = 1$, 则双线性变量仅由分区 s 中的 $T_{i,t,s}$ 、 $M_{ik,t,s}$ 来决定, 而所有其他分区中的变量都强制为 0。典型的分区方案是均匀分区, 随着分区数的增加, 解的精确程度越来越高, 但计算复杂度也会增加。综合以上考虑, 本文设分区数为 3。

$$T_{i,t} = \sum_{s=1}^{N_s} T_{i,t,s} \quad (36)$$

$$M_{ik,t} = \sum_{s=1}^{N_s} M_{ik,t,s} \quad (37)$$

$$\sum_{s=1}^{N_s} y_{i,t,s} = 1 \quad (38)$$

$$T_{i,t,s}^{\min} y_{i,t,s} \leq T_{i,t,s} \leq T_{i,t,s}^{\max} y_{i,t,s} \quad (39)$$

$$M_{ik,t,s}^{\min} y_{i,t,s} \leq M_{ik,t,s} \leq M_{ik,t,s}^{\max} y_{i,t,s} \quad (40)$$

$$y_{i,t,s} \in \{0, 1\} \quad (41)$$

式中 $M_{ik,s}^{\min}$ 和 $M_{ik,s}^{\max}$ 分别为分区 s 中管道 ik 热媒流量的最小值和最大值。

2.4 耦合设备模型

2.4.1 能源集线器模型

通常来说, 电热联合系统可通过变压器、电锅炉、热电联产 (combined heat and power, CHP) 等设备进行耦合。这类设备可统一用能源集线器的概念进行建模, 并用能量耦合矩阵表示其内部的能源调配过程^[31]。如图 3 所示, 能源集线器输入侧为电力和天然气, 输出侧为电功率和热功率, 输入输出关系如式 (42) 所示。为简单起见, 假设能源集线器内部设备的运行效率均为定值。

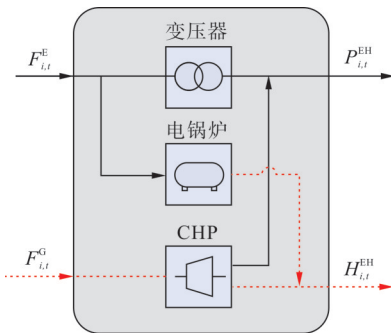


图3 能源集线器模型

Fig. 3 Structure of the EH model

$$\begin{bmatrix} P_{i,t}^{EH} \\ H_{i,t}^{EH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \nu^{EB})\eta^T & \eta_{gc}^{CHP} \\ \nu^{EB}\eta^{EB} & \eta_{gh}^{CHP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{i,t}^E \\ F_{i,t}^G \end{bmatrix} \quad (42)$$

式中: η^T 为变压器传输电能的效率; η^{EB} 为电锅炉制热效率; η_{gc}^{CHP} 、 η_{gh}^{CHP} 分别为天然气经过 CHP 转化为电力和热能的效率; ν^{EB} 为电锅炉的分配系数, 用于表示电锅炉使用的电功率在输入侧电功率中所占的比重, 满足 $0 \leq \nu^{EB} \leq 1$ 。此外, 由于内部耦合设备的容量限制, 能源集线器有一定的工作范围约束, 如式 (43) 所示。目前, 孤立的电热联合系统的电能质量还达不到向电网输送功率的要求^[14], 因此本文不考虑能源集线器向外部电网售电的情况, 即购电和购气的最小值均不小于 0。

$$\begin{cases} F_{i,t}^{E,\min} \leq F_{i,t}^E \leq F_{i,t}^{E,\max}, F_{i,t}^{G,\min} \leq F_{i,t}^G \leq F_{i,t}^{G,\max} \\ F_{i,t}^{E,\min} = 0, F_{i,t}^{G,\min} = 0 \\ F_{i,t}^{E,\max} = P_{i,t}^{EH} + P_{i,t}^{EB,\max}/\eta^{EB} \\ F_{i,t}^{G,\max} = P_{i,t}^{CHP,\max}/\eta_{gc}^{CHP} \end{cases} \quad (43)$$

式中: $F_{i,t}^{E,\min}$ 、 $F_{i,t}^{E,\max}$ 、 $F_{i,t}^{G,\min}$ 、 $F_{i,t}^{G,\max}$ 分别为能源集线器购电、购气量的上下限; $P_{i,t}^{CHP,\max}$ 为 CHP 机组允许输出的最大电功率; $P_{i,t}^{EB,\max}$ 为电锅炉允许输出的最大热功率。

2.4.2 风电场模型

风电场在 t 时段的风电功率 P_t^W 可表示为风电预测功率 $P_t^{W,\text{pre}}$ 与该时段的预测误差 η_t 之和, 即:

$$P_t^W = P_t^{W,\text{pre}} + \eta_t \quad (44)$$

风速是影响风电场输出功率的主要因素, 研究表明不同风速区间下的风电功率预测误差具有不同的分布特点^[32], 且相比于正态分布、Logistic 分布, TSL (t location-scale, TSL) 分布更适用于拟合风电场的预测误差^[33]。因此, 本文采用 TSL 分布来描述风电场的预测误差, 分布参数可根据所选地区各个时段的历史风速数据, 通过极大似然估计方法 (maximum likelihood estimate, MLE) 拟合得到。在进行日前调度时对拟合出的 TSL 分布结果随机采样 M 次, 取其波动量的最大值作为该时段的预测误差, 由此可保留一定的安全裕度, 确保系统在最不利条件时的经济性和弃风消纳量。

为了尽可能多地消纳弃风, 可将谷负荷时多余的风电转化为热能, 进一步提高能源的利用效率。如式 (45) 所示, 弃风 $P_{i,t}^{W,\text{cur}}$ 产生的热能一部分经热泵直接注入到热力系统, 另一部分则存储在蓄热罐中, 当热负荷处于峰值时释放。由于热泵和蓄热罐

的容量限制,可能仍存在部分弃风 $\tilde{P}_{i,t}^{W,cur}$ 。

$$\eta_{W-H} \times (P_{i,t}^{W,cur} - \tilde{P}_{i,t}^{W,cur}) = u_{i,t}^{ch} \times H_{i,t}^{HS} + H_{i,t}^{HP} \quad (45)$$

式中： η_{W-H} 为风电场的电热转换系数； $H_{i,t}^{HS}$ 为蓄热罐在 t 时段的储能功率。

3 算例仿真

3.1 算例介绍

本文研究的电热联合系统在文献[5]的基础上进行一定改进,由6节点电网、31节点热网、1座风电场、1组能源集线器、1台热泵和1个蓄热罐构成,如图4所示,系统中电热网络的拓扑参数见文献[5]。设热泵在每个时段的最大产热功率为2 MW,电热转换系数设为2;蓄热罐的储热功率和最大储热量分别为1 MW和1 MWh。根据2.4.2节所提风电场模型做出的风电预测功率与实际输出功率如图5所示,其中每个时段的随机采样次数设为 $M=10$ 次。此外,设热源节点的供热温度为100 ℃,各负荷节点的回热温度为50 ℃。电力系统总有功负荷为50 MW、总无功负荷为20 MVA,分别以0.2、0.4、0.4的比例分配到节点B4—B6。能源集线器内部各耦合设备的运行参数见表1;常规发电机组采用小型燃气轮机,其成本参数和运行参数见表2。算例的计算环境是一台操作系统为Windows 10的笔记本电脑,系统类型为64位,内存容量为16 GB,处理器为AMD Ryzen 7 4800 H,主频为2.9 GHz。在MATLAB R2020b及Yalmip平台上建立本文所提的MIQP模型,并调用CPLEX 12.1求解器进行求解。

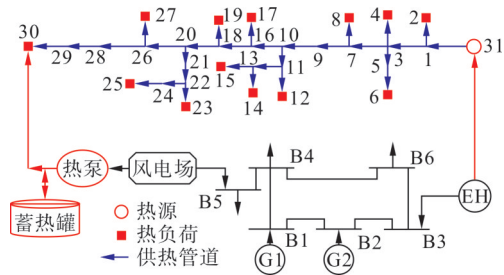


图4 电热联合系统算例分析
Fig. 4 Studied case of combined heat and power system

为验证本文所提电热联合系统优化运行方法的有效性,对不同场景下系统的运行结果进行对比分析,其中场景4为本文所提出的优化方法。

场景1: 无热泵, 无储能, 不考虑热网损耗;

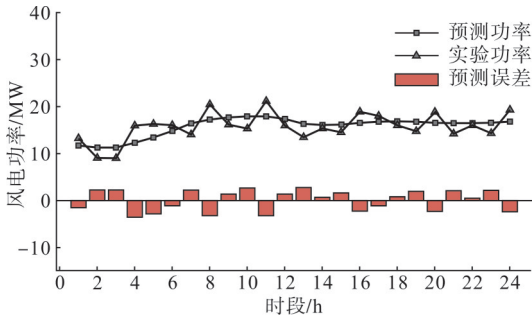


图5 风电场的预测功率与实际输出功率
Fig. 5 Predicted powers and actual output powers of wind farm

表1 能源集线器内部各设备运行参数
Tab. 1 Operating parameters of EH components

设备名称	容量/MW	运行效率	分配系数
变压器	40	1	
电锅炉	40	2	0.45
CHP	20	0.2(η_{ge}^{CHP})	
		0.6(η_{gh}^{CHP})	

表2 常规发电机组运行参数
Tab. 2 Operating parameters of electrical generator

设备编号	成本系数/(美元·MW ⁻¹)			最大出力/ MW	最小出力/ MW	爬坡功率/ MW
	a_0	a_1	a_2			
G1	2 130	11.669	0.053 3	20	7	3
G2	2 000	10.333	0.088 9	18	5	3

场景2: 无热泵, 无储能, 考虑热网损耗;

场景3: 有热泵, 有储能, 不考虑热网损耗;

场景4: 有热泵, 有储能, 考虑热网损耗。

3.2 算例结果

3.2.1 系统优化调度结果

调度周期内,电热联合系统的电负荷供应需求由能源集线器、常规发电机组G1、G2和风电场满足,热负荷的供应需求由能源集线器和热泵满足。通过运行本文所提出的MIQP模型,能够计算各可调节单元的调度出力,得到系统在最小运行成本下的优化调度结果如图6—7所示。

从图6可以看出,为了与热力系统进行协调,电力系统在各时段均保留了一定的风电剩余量,以便通过热泵将电能转化为热能注入热网;尤其是在第3—5时段,电负荷处于低谷时期,因此弃风量较多。从第24时段到第7时段,能源集线器以较低的价格向外部电网购电,成为主要的供电设备,其输出功率超过常规发电机组。而在其他时段,由于能源集线器的购电价格上升,电力系统优先使用常

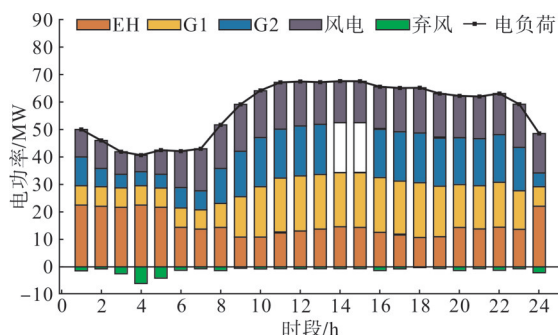


图6 电力系统优化运行结果

Fig. 6 Power system optimization operation results

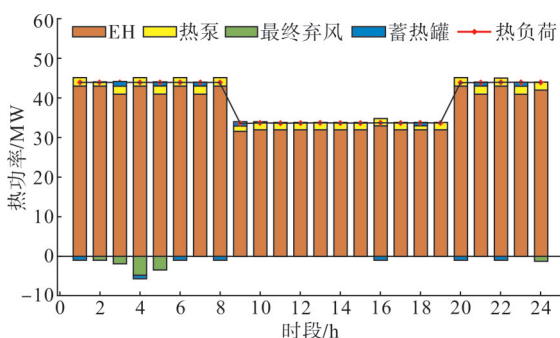


图7 热力系统优化运行结果

Fig. 7 Heating system optimization operation results

规发电机组输出功率,在G1和G2的输出功率达到限值时,不足的功率再由能源集线器进行平衡。由此可见,能源集线器起到缓冲生产和需求变化的作用,有助于提高火电机组的运行效率。

对于热平衡,通过观察图7可以看到能源集线器是热力系统的主要供能设备。作为电热耦合设备,热泵能够利用电网的弃风电量进行制热,从而减少能源集线器的能量消耗。图7中,当蓄热罐的热功率为负数时表示热量储存;当蓄热罐的热功率为正数时表示热量释放。可以观察到,在电力系统弃风量较高的时段蓄热罐储存热量;而在热量需求较大的时段释放热量以满足热负荷需求。通过蓄热罐的充放热过程能够实现能源的时间转换,最大限度地消纳风电并提高能源利用效率。需要注意的是,由于热泵和蓄热罐的容量存在上限,无法将全部弃风转化为热能,剩余的部分通过最终弃风量表示。因此,各时段的最终弃风量之和越少,代表电热联合系统的风电消纳能力越强。

3.2.2 热力系统的能量分布

为了突显风电制热对系统运行的影响,图8和图9对比了热负荷高峰(第5时段)和非高峰时段(第

15时段)下热力系统的能量分布情况。假设第5时段采用了本文所提出的模型,而第15时段不考虑风电的接入。从图8可以看出,节点温度沿着热网传输能量的方向呈下降趋势,即靠近热源处的节点温度较高,而管道末端热负荷节点温度较低。第5时段的热负荷需求较大,因此各节点供热温度较高。然而,由于第15时段没有考虑风电的接入,图中显示的节点温度在30节点附近下降速度比第5时段更快。此外,节点26到节点28之间的温度差异较大,原因是连接这两个节点的管道长度较长,其长度为2780 m,导致沿该管道的温度下降幅度较大。从图9可以看出,高峰时段的热负荷供应需求较大,因此各管道流量均高于非高峰时段,且主要供热管道(如管道1和管道3)的流量相对较高,而通向负荷节点的管道流量相对较低。

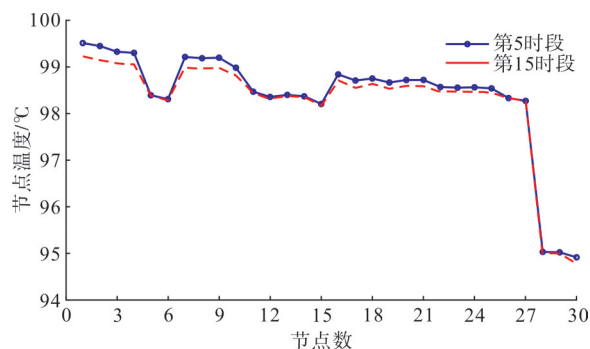


图8 高峰和非高峰时段的节点温度

Fig. 8 Peak and off-peak temperature of heat nodes

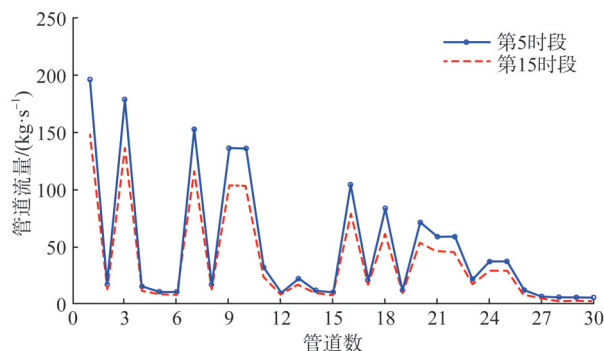


图9 高峰和非高峰时段的管道流量

Fig. 9 Peak and off-peak mass flow rate of heat pipes

为了说明热媒在热力系统管道中的分布情况,分别取管道1、管道16和管道30分析各个时段不同位置处管道流量的变化情况,如图10所示。可以看到,热媒沿着管道方向从31号节点依次流向30号节点,因此管道1的流量最高,管道16次之,而

靠近最末端负荷节点的管道 30 流量最低。除此之外,管道流量的变化量与管道所需供应的热负荷有关,越靠近节点 31 的管道,其由热负荷引起的流量变化越明显。这是因为靠近热源 of 管道需承担其下方所有热负荷的变化,而靠近热网末端负荷节点的管道只需考虑自身所供应的热负荷变化。

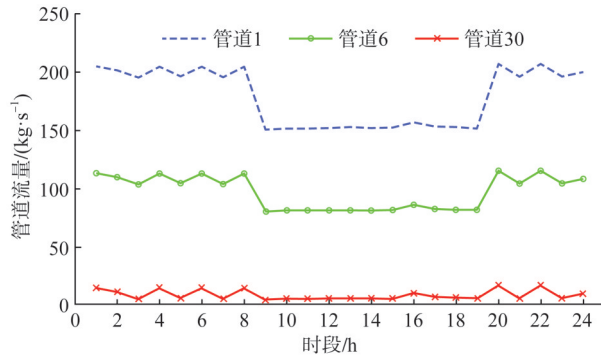


图 10 不同位置处的管道流量

Fig. 10 Mass flow rate of heat pipes at different locations

3.2.3 不同场景的总成本和风电消纳情况

为了简化计算,当前许多文献在电热联合系统的建模过程中经常忽略热网损耗^[16, 34]。从表3可以看出,虽然在不考虑热网损耗的情况下,系统的总运行成本和弃风量都比考虑热网损耗时更小,但这可能导致在实际运行中热源的出力不足以满足热负荷的需求,从而牺牲了一定的安全性。在考虑热网损耗的情况下,当系统配备热泵和储能时总运行成本比无热泵无储能时节约了 2 400 美元,弃风量比不考虑风电制热时减少了 8 778 kW,这充分说明将电热进行耦合能实现多种能源的协调运行,提高系统消纳弃风的能力。然而,无论采用何种运行方式,最终都会有一定量的弃风没有被完全消纳^[35]。这是因为热泵具有容量限制,无法将所有的风电转化为热能。如果热泵的容量足够大,通过电热系统的协调运行就有机会实现对风电的完全消纳。

在求解时间方面,场景 1 的和场景 3 由于没有考虑热网的损耗,因此求解时间较短;场景 4 的求解时间最长,因为其不仅要管道温度降的约束,还需考虑风电场、热泵与储能设备之间的协调配合,增加了问题的复杂性。然而,与文献[5]中提出的分解协调算法相比,本文所提出的模型实现了约束的全线性化,从而避免了在电热子系统中反复进行迭代的过程。这一改进使得电热联合系统的 24 h 调

度任务可以在大约 4 min 内完成,显著降低了优化调度所需的时间和计算复杂度,为电热联合系统的实际应用提供了更高效的解决方案。

表 3 4 种场景的求解结果

Tab. 3 Calculation results for the four scenarios

运行场景	成本/万美元	弃风量/MW	求解时间/s
场景 1	16.167	4.850	52.844
场景 2	17.371	20.283	78.528
场景 3	15.997	0.861	56.487
场景 4	17.131	11.505	196.973

3.2.4 考虑和不考虑热网损耗的对比分析

根据上述讨论,热网损耗信息可以帮助系统运营商及时调整热源的出力,以更好地满足热负荷的需求。由苏霍夫降温公式可得,热网传输损耗与热负荷、管道长度、管道流量、环境温度等因素相关。从图 11 可以看出,当热负荷较高时热网损耗也较大;而当热负荷较低时热网损耗较小。此外,当周围环境温度较高时管道内热媒与外界发生的热交换较少,因此热网损耗也较小。

进一步比较场景 3 和场景 4,在考虑和不考虑热网损耗的情况下分析热源出力的变化,结果如图 12 所示。可以看出,在不考虑热网损耗时热源在全时段的总出力为 725 MW,而考虑热网损耗时为 899 MW,增加了 19.4%。虽然不考虑热网损耗时系统的优化成本较低,但这可能导致热源的调度出力不足。因此,考虑管道传输过程中的热损失对热源调度具有重要意义。

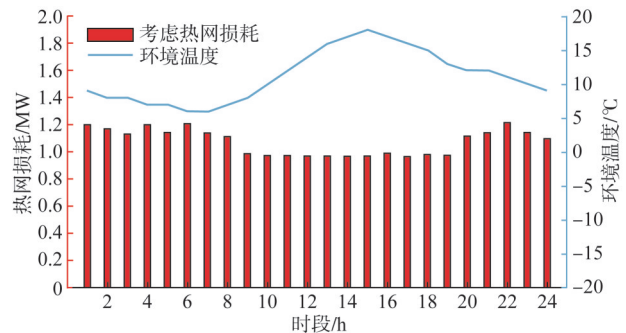


图 11 不同时段的热网损耗情况

Fig. 11 Heat losses of heat network at different time periods

3.2.5 McCormick 凸松弛误差分析

与原本的双线性模型相比,采用 McCormick 凸松弛方法不可避免地会对节点温度和管道流量的计算

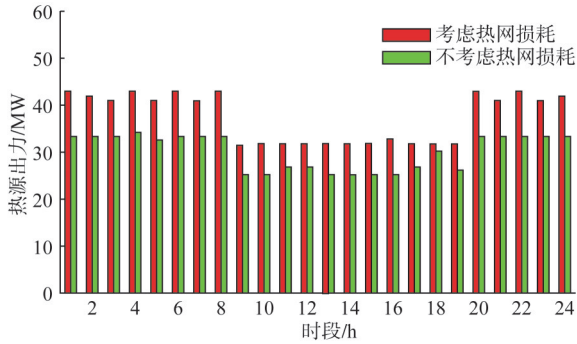


图 12 考虑和不考虑损耗时的热源出力情况

Fig. 12 Outputs of heat source with and without consideration of heat loss

引入了一定的近似。由于在 2.3.6 节选取节点温度作为分区变量, 为了量化近似后的误差, 分别计算各时段节点供热温度的最大相对误差, 如式 (46) 所示。

$$\eta_{\text{error}} = \max_{i \in N_{\text{node}}} \left\{ \frac{|T_{i,t} - T_{i,t}^{\text{ref}}|}{T_{i,t}^{\text{ref}}} \times 100\% \right\} \quad (46)$$

式中: $T_{i,t}^{\text{ref}}$ 为使用非线性的管道温度降方程式 (24) 计算得到的节点温度参考值; N_{node} 为热力系统中节点的索引集合。将本文所提分段 McCormick 凸松弛方法处理后的结果与参考值进行比较, 得出各时段节点温度与参考值的最大相对误差如图 13 所示。

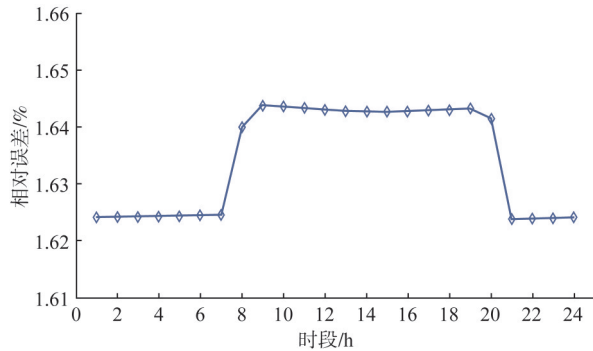


图 13 热力系统节点温度的最大相对误差

Fig. 13 Maximum relative errors of node temperatures in the heating system

从图 13 可以看出, 各个时段节点温度与参考值的最大相对误差不超过 1.65%, 处于可接受的范围之内, 由此验证了所提方法的有效性。除此之外, 将图 13 的结果与附图 B1 中热负荷的波动率进行比较可以发现, 热负荷较高时节点温度与参考值的最大相对误差较小, 而热负荷较低时节点温度与参考值的最大相对误差较大。这是因为在热负荷较

低的情况下系统需要传递的热量较少, 因此各节点的温度变化也较小, 双线性项的影响可以忽略不计。此时采用 McCormick 凸松弛方法近似双线性约束, 可能会使得松弛过度, 从而造成近似误差的增大。

3.2.6 风电场接入热网节点的位置比较

为了提高系统的经济性和风电消纳能力, 本节对风电场接入热网节点的最佳位置进行分析。一般情况下风电场接入热网节点的位置是根据风力资源丰富情况和热力负荷需求确定的。而在范围较小的区域综合能源系统条件下, 热网各节点处的风速变化不会太大, 因此可近似认为各节点具有相同的风力资源, 风电场接入热网节点的最佳位置主要由热负荷决定。为此在热力系统的所有负荷节点进行测试, 通过 min-max 极差标准化将所得调度结果的系统运行成本和最终弃风量进行归一化处理, 并设置不同的目标权重 ω 进行加权求和, 作为风电场选址的决策依据, 计算公式为:

$$\tilde{F} = \omega \tilde{F}_1 + (1 - \omega) \tilde{F}_2 \quad (47)$$

式中: $\tilde{F}_1$ 和 $\tilde{F}_2$ 分别为归一化后的系统运行成本和最终弃风量; $\tilde{F}$ 为归一化后的目标函数值, 它的值越小代表系统的经济效益和风电消纳能力越好。各热负荷节点在不同目标权重时的计算结果如图 14 所示, 可以看出将风电场连接到热力系统的节点 30, 即供热网络的末端时系统运行成本和弃风量的归一化加权和值达到最小; 并且当弃风消纳量所占的权重越来越高时节点 30 仍能保持较为稳定的加权目标函数值, 说明在更关注弃风消纳的调度场景下, 风电场接入热网的最佳位置更适合取为节点 30。值得注意的是, 虽然节点 2、节点 17 和节点 23 也表现出较好的目标函数值, 但是在热网末端附近有一段较长的管道 (28 号管道) 长度为 2 780 m, 因此从这些节点向热网末端输送热能的传输路径较长, 导致热损失大于直接从节点 30 向热网供应热量。这一结论也突出了考虑热网损耗对于选择风电场接入位置的重要性。

3.2.7 发电机组在不同位置接入热泵的比较

在电力系统中, 除了风力发电机组通过热泵制热, 常规发电机组也能为热泵提供电能, 从而进一步加强电力系统与热力系统的耦合。由于常规发电机组 G2 的发电成本较低, 本节讨论了 G2 在不同位

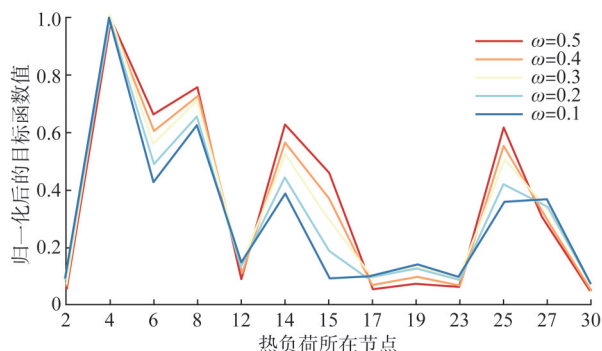


图 14 风电场接入热网负荷节点的位置比较

Fig. 14 Comparison of the locations of nodes connecting wind farm to heat supply network

置接入热泵时对系统运行成本和风电消纳率的影响。以场景 4 作为对照, 新增场景 5 至场景 8 分别表示 G2 通过热泵为热网末端负荷节点 30、27、23、12 提供热能, 图 15 显示了各场景在不同时段的风电消纳率。可以看出, 当 G2 与风电场在同一节点 (节点 30) 接入热泵时, 由于热泵具有容量限制, 风电消纳率并没有明显的提升。然而, 此时系统总运行成本为 17.095, 较场景 4 下降了 0.21%; 当 G2 在其他负荷节点接入热泵时风电消纳率均有显著提升, 其中场景 8 的风电消纳率最高, 弃风量降至 4.993 MW。同时, 各场景对应的系统运行成本分别下降了 1.02%、1.58% 和 1.45%。这充分表明了利用常规发电机组参与制热可以使更多的风能被有效利用, 并具有改善系统经济性的潜力。

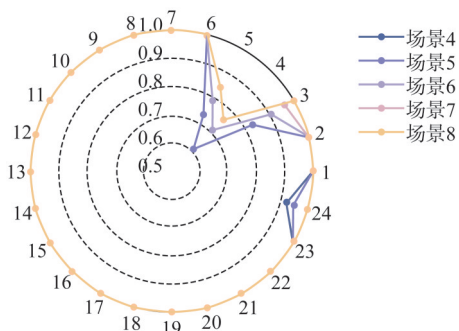


图 15 在不同位置接入热泵时的风电消纳率

Fig. 15 Wind power accommodation rates when the heat pump is connected at different locations

4 结论

本文提出一种考虑风电消纳的电热联合系统 MIQP 优化调度模型。在包含能源集线器、风电场、

热泵、蓄热罐的综合能源系统中, 通过电力系统和热力系统的耦合建立了电热联合系统稳态潮流模型, 并计算出在最小运行成本下各可调度单元的出力情况。通过对不同场景下的运行情况进行对比分析, 验证了所提方法的有效性, 得出以下结论。

1) 在保证精度的前提下, 将原本的大规模非线性优化问题简化成 MIQP 模型, 可以显著提高计算效率。对本文所提的电热联合系统模型, 仅需 4 min 就能完成 24 h 调度任务, 特别适用于对在线调度需求较高的场景。

2) 相比于风机单独供电, 将多余的风电用于制热可以促进电网和热网的协调运行, 引入储热设备可以提升系统的调度灵活性。当系统配备热泵和储能时, 总运行成本比无热泵无储能时降低了 1.4%, 弃风量降低了 43.3%, 由此可见电热联合系统具有十分显著的经济效益和风电消纳能力。

3) 将常规发电机组用于热泵制热可以进一步加强电力系统与热力系统的耦合, 从而提高系统的风电消纳率。当发电机组 G2 接入热网末端负荷节点时, 各时段的弃风量最多可降至 4.993 MW, 同时系统总运行成本最多可降低 1.58%。

4) 热网损耗在优化调度的过程中不能忽略, 否则可能导致系统供热不足以满足负荷需求。且热网损耗对于确定风电场接入位置具有指导作用, 本文确定风电场的最佳接入位置为节点 30, 此时系统运行成本和弃风量的归一化加权和值达到最小。

本文提出的 MIQP 模型在解决电热联合系统的优化调度问题上取得了较好效果。然而, 对于模型精度的进一步提高、能源集线器内部参数的科学优化以及热泵和蓄热罐容量如何与预测风电进行配合等问题仍有待进一步的探索。

参考文献

- [1] 李哲, 李俊杰, 周念成, 等. 基于多能源协同的微电网群能源转供优化模型[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 89-98.
LI Zhe, LI Junjie, ZHOU Niancheng, et al. An optimal energy transfer model based on multi-energy collaboration in micro-energy network group [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 89-98.
- [2] LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. A two-stage multi-objective scheduling method for integrated community energy system[J]. Applied Energy, 2018(216): 428-441.
- [3] 黄旭锐, 于丰源, 杨波, 等. 基于 Transformer 网络和多任务学习的园区综合能源系统电-热短期负荷预测方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 152-160.

- HUANG Xurui, YU Fengyuan, YANG Bo, et al. Short-term electric-thermal load forecasting method for park-level integrated energy system based on transformer network and multi-task learning [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 152 – 160.
- [4] 潘超, 范官博, 王锦鹏, 等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1633 – 1647.
- PAN Chao, FAN Gongbo, WANG Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633 – 1647.
- [5] LI Jinghua, FANG Jiakun, ZENG Qing, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources [J]. Applied Energy, 2016, (167): 244 – 254.
- [6] 卢志刚, 杨宇, 耿丽君, 等. 基于 Benders 分解法的电热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1922 – 1934, 2208.
- LU Zhigang, YANG Yu, GENG Lijun, et al. Low-carbon economic dispatch of the integrated electrical and heating systems based on Benders decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1922 – 1934, 2208.
- [7] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N. et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016(162): 1238 – 1250.
- [8] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 18 – 26.
- SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. “Source-network-load-storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 18 – 26.
- [9] 付中洲, 袁铁江, 皮霞. 含储热的电热联合系统优化调度模型[J]. 电器与能效管理技术, 2018(14): 63 – 68, 78.
- FU Zhongzhou, YUAN Tiejia, PI Xia. Optimized dispatching model of combined heat and power system included thermal energy storage [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(14): 63 – 68, 78.
- [10] 郭宇航, 胡博, 万凌云, 等. 含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 16 – 22.
- GUO Yuhang, HU Bo, WAN Lingyun, et al. Optimal economic short-term scheduling of CHP microgrid incorporating heat pump [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 16 – 22.
- [11] BASU M. Combined heat and power economic dispatch using opposition-based group search optimization [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 73(12): 819 – 829.
- [12] JAYAKUMAR N, SUBRAMANIAN S, GANESAN S, et al. Grey wolf optimization for combined heat and power dispatch with cogeneration systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016(74): 252 – 264.
- [13] 崔雪, 邹晨露, 王恒, 等. 考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 74 – 81.
- CUI Xue, ZOU Chenlu, WANG Heng, et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 74 – 81.
- [14] 吴雄, 王秀丽, 别朝红, 等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 1 – 6.
- WU Xiong, WANG Xiuli, BIE Zhaozhong, et al. Economic operation of microgrid with combined heat and power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 1 – 6.
- [15] CHEN Changming, WU Xueyan, LI Yan, et al. Distributionally robust day-ahead scheduling of park-level integrated energy system considering generalized energy storages [J]. Applied Energy, 2021(302): 117493.1 – 117493.9.
- [16] HUANG Shaojun, TANG Weichu, WU Qiuwei, et al. Network constrained economic dispatch of integrated heat and electricity systems through mixed integer conic programming [J]. Energy, 2019(179): 464 – 474.
- [17] 刁涵彬, 李培强, 王继飞, 等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4532 – 4543.
- DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532 – 4543.
- [18] SASHIREKHA A, PASUPULETI J, MOIN N H, et al. Combined heat and power (CHP) economic dispatch solved using Lagrangian relaxation with surrogate subgradient multiplier updates [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1): 421 – 430.
- [19] WANG Lixiao, ZHENG Jiehui, LI Mengshi, et al. Multi-time scale dynamic analysis of integrated energy systems: An individual-based model [J]. Applied Energy, 2019, 237: 848 – 861.
- [20] 朱浩昊, 朱继忠, 李盛林, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 383 – 397.
- ZHU Haohao, ZHU Jizhong, LI Shenglin, et al. Review of optimal scheduling of integrated electricity and heat systems [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 383 – 397.
- [21] CASTILLO P A, CASTRO P M, MAHALE C V. Global optimization of MIQCPs with dynamic piecewise relaxations [J]. Journal of Global Optimization, 2018, 71(4): 691 – 716.
- [22] CASTRO P M. Tightening piecewise McCormick relaxations for bilinear problems [J]. Computers & Chemical Engineering, 2015(72): 300 – 311.
- [23] 范志成, 朱俊澎, 袁越, 等. 基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 504 – 513.
- FAN Zhicheng, ZHU Junpeng, YUAN Yue, et al. Distributed generation planning model of active distribution network and linearization method based on improved DC power flow algorithm [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 504 – 513.
- [24] DING Tao, BO Rui, LI Fangxing, et al. A bi-Level branch and bound method for economic dispatch with disjoint prohibited zones considering network losses [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 2841 – 2855.
- [25] VARADARAJAN M, SWARUP K S. Solving multi-objective optimal power flow using differential evolution [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(5): 720 – 730.
- [26] 赵静波, 卫志农, 刘建坤, 等. 电力系统线性化动态最优潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 86 – 92.

- ZHAO Jingbo, WEI Zhinong, LIU Jiankun, et al. Linearized dynamic optimal power flow model for power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 86–92.
- [27] 路晓敏, 陈磊, 徐飞, 等. 电热综合能源系统框架下蒙西电网电源容量最优配比研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 132–138.
- LU Xiaomin, CHEN Lei, XU Fei, et al. Optimal energy-source capacity ratios of integrated electricity-heat energy system of West Inner Mongolia Power Grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 132–138.
- [28] DENG Lirong, SUN Hongbin, LI Baoju, et al. Optimal operation of integrated heat and electricity systems: a tightening McCormick approach[J]. Engineering, 2021, 7(8): 1076–1086.
- [29] 汤木易, 罗毅, 胡博, 等. 电热联合调度模型综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 161–175.
- TANG Muyi, LUO Yi, HU Bo, et al. A review of the dispatch model of a combined heat and power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 161–175.
- [30] LU Shuai, GU Wei, ZHANG Cuo, et al. Hydraulic-thermal cooperative optimization of integrated energy systems: a convex optimization approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4818–32.
- [31] JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems [J]. Applied Energy, 2016(180): 1–13.
- [32] 丁华杰, 宋永华, 胡泽春, 等. 基于风电场功率特性的日前风电预测误差概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 136–145.
- DING Huajie, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Probability density function of day-ahead wind power forecast errors based on power curves of wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 136–145.
- [33] 黎静华, 左俊军, 汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503–3513.
- LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503–3513.
- [34] 张义志, 王小君, 和敬涵, 等. 考虑供热系统建模的综合能源系统最优能流计算方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 562–570.
- ZHANG Yizhi, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Optimal energy flow calculation method of integrated energy system considering thermal system modeling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 562–570.
- [35] 姜楠, 戴赛, 许丹, 等. 计及机组组合与线路重构协同的电热联合系统消纳弃风研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 105–113.
- JIANG Nan, DAI Sai, XU Dan, et al. Wind power consumption in a CHP system considering the collaboration of unit combination and line reconstruction [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 105–113.

收稿日期: 2023-05-22; 网络首发日期: 2024-03-14

作者简介:

徐小圣(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统建模与运行优化, 202120114883@mail.scut.edu.cn;

徐昌睿(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为复杂能源系统动态建模及仿真, 202120114877@mail.scut.edu.cn;

李梦诗(1982), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为人工智能、随机优化算法、电力系统优化应用和复杂系统建模, mengshili@scut.edu.cn。