

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202116

计及用热舒适度弹性的热电联合优化调度

董彧彤¹, 王艳松¹, 倪承波², 衣京波³

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 胜利石油管理局, 山东 东营 257000;
3. 胜利石油管理局胜利发电厂, 山东 东营 257087)

摘要: 冬季采暖期热电联产机组为满足供热需求, 强迫电出力导致机组调峰能力受限。为提高热电联供系统调峰能力, 促进可再生能源的消纳, 首先建立热负荷供能设备的运行特性模型, 在负荷侧通过引入室外气象综合温度, 建立了考虑用热舒适度的热负荷模型。以总煤耗量最小、最大限度消纳光伏为目标, 建立考虑用热舒适度弹性的热电联合优化调度模型, 并通过仿真验证其有效性。结果表明, 用户在用热舒适度弹性范围内通过热舒适度下调, 为光伏出力高峰阶段提供弹性上网空间, 可以有效提高光伏发电的消纳水平, 同时降低了燃料成本。而配合高效率的热源设备时, 考虑室外气象综合温度的热负荷调节方式进行消峰效果不明显。

关键词: 热电联合调度; 用热舒适度; 二级热网辅助热源; 空气热泵

Dispatch of a combined heat-power system considering elasticity with thermal comfort

DONG Yutong¹, WANG Yansong¹, NI Chengbo², YI Jingbo³

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Shengli Petroleum Bureau, Dongying 257000, China; 3. Shengli Power Plant, Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257087, China)

Abstract: In the winter heating period, the forced power output of cogeneration units is at a high level to meet heating demand. This leads to the limited peak regulation capacity of units. To improve the peak regulation ability of the cogeneration system and promote the absorption of renewable energy, the meteorological factors affecting the thermal comfort level are considered, and an operational strategy of exploiting the elasticity of the thermal load side is formulated. First, the operating characteristic model of thermal energy supply equipment is established. In the load side, the thermal load model considering thermal comfort is established by introducing the outdoor meteorological temperature. Then, aiming at minimizing total coal consumption and maximizing photovoltaic consumption, a combined optimization scheduling model considering thermal comfort elasticity is established. Its effectiveness is verified by simulation. The results show that by reducing the thermal comfort level within the elastic range of the user's thermal comfort level, flexible Internet space can be provided for the peak stage of photovoltaic output. This can effectively improve the consumption level of photovoltaic power generation and reduce the fuel cost. However, when combined with high efficiency heat source equipment, the effect of heat load regulation considering the comprehensive outdoor meteorological temperature on peak reduction is not obvious.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province (No. 2019GGX103045).

Key words: combined heat-electricity scheduling; hot comfort; auxiliary heat source of secondary heat network; air source heat pump

0 引言

我国三北地区冬季供暖时间长、采暖热负荷需求大, 采暖期间热电联产机组出力需优先满足用户

热负荷需求, 机组强迫电出力始终处于较高水平。供热需求, 是机组工作在“以热定电”运行模式的首要原因^[1-2]。热电机组具有热电耦合特性, 为满足供热需求电出力范围变窄, 导致机组调峰能力受限, 显著限制了系统消纳可再生能源的能力^[3-4]。热电联产机组、储热装置、电锅炉以及热泵等耦合元件加

基金项目: 山东省重点研发计划项目资助(2019GGX103045)

深了电力系统与供热系统之间的耦合, 通过系统内热能和电能之间的协调管理与优化调度, 可以在降低系统运行成本的同时, 实现可再生能源的充分消纳^[5-6]。

国内集中供暖系统在室内并没有自主调节手段, 建筑物的热动态直接受热源和热网的调节, 以及受室外气象条件变化的影响。计及供热环节对多能系统调度的影响, 文献[7]考虑了热网的动态特性, 仿真实现电热供需曲线的平移匹配, 提高了可再生能源消纳水平。文献[8-9]建立了考虑换热站的灵活性、管道和建筑物蓄热的供热模型, 仿真获取了更加准确的优化调度结果, 促进风电的消纳。文献[10]结合了生物质燃烧供能与 CHP 系统, 仿真证明了生物质能的应用提高了 CHP 系统的综合用能效率。采暖热用户广泛分布且可调节容量丰富, 针对电、热等负荷柔性特征和可调度价值, 结合负荷在多能系统中形成的耦合关系, 可有效解耦热电机组“以热定电”的刚性约束, 进而提升热电机组的调节灵活性, 降低系统运行成本。文献[11]建立了用于评估室内温度变化的建筑物热力学模型, 通过协调需求响应提高风电利用率。文献[12]针对电气热负荷柔性特征和可调度价值, 仿真验证所建立多目标优化调度模型可提高能源利用效率。文献[13]通过博弈协调供热负荷的需求响应, 仿真表明所提方法可有效促进风电消纳, 减少碳排放量。文献[14]在需求侧对负荷类型进行分类, 构建包含热负荷供能方式响应的供需双侧协同优化模型, 仿真表明模型能有效提高系统供能的灵活性以及运行经济性。文献[15]提出了在热负荷侧综合利用采暖建筑用户热负荷弹性、与分时电价需求侧响应协同的调度方法, 仿真证明了能源利用率和系统经济性的提高。

综合来看, 当前在热电联合调度系统对柔性热负荷的利用, 主要利用了电热系统的耦合关系, 考虑了热源和热网的调节作用, 忽视了室外气象条件的影响。事实上, 将热负荷作为柔性负荷参与热电调度的过程中, 为了保证采暖用户的热舒适, 建立计及综合气象因素的用热舒适度标准是必要的。

因此, 本文针对具有季节性供热需求和大规模光伏发电消纳需求的区域热电联供系统调度问题展开研究。首先分析了采暖热负荷波动对热电机组运行出力的影响, 建立了供能设备的出力模型; 然后考虑了影响热负荷的气象条件因素, 引入了室外气象综合温度并以其作为热负荷计算中室外温度的修正值, 求得了考虑用热舒适度的热负荷曲线; 随后

分析系统电负荷和热负荷的用能需求, 建立热电联合优化调度模型, 以系统全局能耗成本最小为目标进行求解。最后应用 Matlab 进行仿真计算, 分析不同场景下用热舒适度对系统调度结果的影响。

1 热电机组的热电耦合特性

在冬季, 自备热电厂在承担电负荷的同时, 还需要满足集中采暖的热负荷需求, 汽轮机工作在抽凝状态。由于供热量需求和汽轮机低压缸最小流量约束, 使得高压缸中蒸汽量下限升高, 因此汽轮机的输出存在一定的热电耦合约束^[16]。本节结合热电联产机组的电热特性对考虑供热负荷弹性前后的电热运行点变化进行分析。

热电机组的运行应满足热、电技术约束, 包括热出力上下限约束。

$$0 \leq Q_{n,h,t} \leq \bar{Q}_{n,h} \quad (1)$$

式中: $Q_{n,h,t}$ 为 t 时段机组 n 的热出力; $\bar{Q}_{n,h}$ 为机组 n 的热出力上限。

热电机组热功率的表达式为

$$Q_{n,h,t} = D_{n,t} \Delta H / 1000 \quad (2)$$

式中: $D_{n,t}$ 为 t 时段机组 n 的抽汽量; ΔH 为蒸汽焓降。

计及低压缸最小流量约束的热电机组电出力下限为

$$\underline{P}_{n,d,t} = \frac{D_{d,n}}{D_{e,n,0}} \cdot \bar{P}_n + b_n Q_{n,h,t} \quad (3)$$

式中: $D_{e,n,0}$ 、 $D_{d,n}$ 分别为机组 n 的额定进汽容量与低压缸最小流量; \bar{P}_n 为机组 n 的锅炉热出力上限下机组纯凝发电时的发电功率; b_n 为机组 n 单位产热量伴随的发电量; $Q_{n,h,t}$ 为机组 n 的热出力。

计及锅炉出力的热电机组电出力上下限为

$$\underline{P}_{n,B,t} = \underline{P}_n - a_n Q_{n,h,t} \quad (4)$$

$$\bar{P}_{n,B,t} = \bar{P}_n - a_n Q_{n,h,t} \quad (5)$$

式中: \bar{P}_n 、 \underline{P}_n 分别为机组在锅炉出力上下限时的发电功率; a_n 为机组 n 的单位产热量影响的发电量。

由式(3)一式(5)可得, 热电机组在采暖期的电出力下限为

$$\underline{P}_{n,e,t} = \max(\underline{P}_{n,d,t}, \underline{P}_{n,B,t}) \quad (6)$$

综上, 热电机组在采暖期的电出力上下限为

$$\underline{P}_{n,e,t} \leq P_{n,e,t} \leq \bar{P}_{n,e,t} \quad (7)$$

抽凝式热电联产机组的电热特性如图 1 所示, L_1 与 L_2 分别表示最小、最大进汽工况, L_3 表示最小凝汽工况, 近似于背压工况。

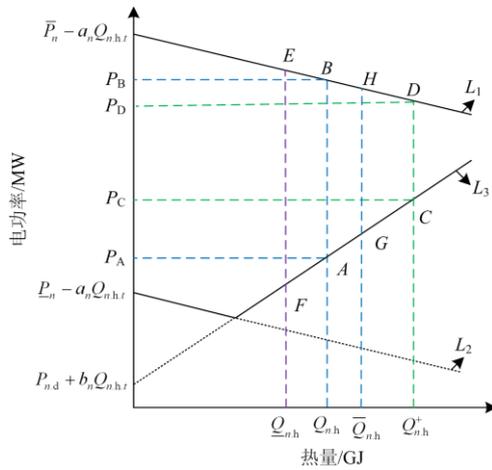


图1 热电联产机组的电热特性曲线

Fig. 1 Thermal-electric curve of thermal power unit

设定热负荷为定值，机组的热出力为 $Q_{n,h}$ ，对应的系统电出力可在线段 AB 上移动。随着供暖量增加至 $Q_{n,h}^+$ ，电功率的可调范围由 $P_B - P_A$ 降至 $P_D - P_C$ 。采暖热功率影响的电功率下限 L_3 严重限制了自备热电厂冬季的调峰能力，即为“以热定电”约束，在一天中的光伏出力高峰时段，消纳光伏之后的等效电负荷需求小于热电厂的电功率下限，热电机组无法稳定运行，不能满足调峰需求。

若计及系统采暖热负荷的波动，在一天中波动范围为 $[Q_{n,h}^-, \bar{Q}_{n,h}]$ ，则热电机组的电出力可以在多边形 EFGH 内变动。机组的电出力不再严格地受到采暖热负荷需求的制约，实现了热电解耦。

2 二级热网辅助热源模型

热电厂在冬季承担采暖热负荷，作为基本热源。采用分布式调峰方案，在二级热网换热站处加装辅助热源^[17]，辅助热源开启时与换热站的热交换设备一同对二级热网中热水进行加热。

采用电锅炉作为辅助热源时，系统等效电负荷提高，同时电锅炉承担了部分采暖热负荷，相当于系统热电比下降，为可再生能源提供更多上网空间。电锅炉的热电转换关系式为

$$Q_{EB,t} = 3.6\delta_{EB}P_{EB,t} \quad (8)$$

式中： $Q_{EB,t}$ 为电锅炉热功率； δ_{EB} 为电锅炉电热转换效率，通常取 0.95。

热电厂作为主要热源，电锅炉作为辅助热源，采取弃光启停控制，弃光标志量 A ， $A=1$ 时电锅炉开启， $A=0$ 时电锅炉关闭。

$$A = \begin{cases} 0 & \sum_{n=1}^N \underline{P}_{n,e,t}(D) + \sum_{m=1}^M \underline{P}_{m,con,t} + P_{pv,t} \leq P_{e,t} \\ 1 & \sum_{n=1}^N \underline{P}_{n,e,t}(D) + \sum_{m=1}^M \underline{P}_{m,con,t} + P_{pv,t} > P_{e,t} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\underline{P}_{n,e,t}(D)$ 为 t 时段热电机组 n 抽汽速率为 D 时的最低电出力； $\underline{P}_{m,con,t}$ 为 t 时段纯凝机组 m 的最低电出力。各机组对应的电出力下限由电负荷按抽汽容量的比例进行分配而得到。

空气源热泵热水器利用空气作为低温热源，通过消耗部分电能制取生活热水。以周围空气为热源时，全年运行的平均单位功率制热量可达到 4.0，与传统的电加热或者燃煤锅炉相比，可以节省 75% 的能量^[16]。高效、灵活的空气源热泵也是可供选择的辅助热源之一，热泵的热电转换关系式如式(10)所示。

$$Q_{HP,t} = 3.6\delta_{HP}P_{HP,t} \quad (10)$$

式中： $Q_{HP,t}$ 为热泵热功率； δ_{HP} 为热泵电热转换效率，空气源热泵在 0°C 左右时的转换效率可取 3。

空气源热泵的电热转换效率高于电锅炉，用于供给等量热负荷时耗电量更低，系统运行成本更低。采用空气源热泵辅助供热，热负荷场景相同时，等效电负荷比采用电锅炉时更低，对热电厂运行和可再生能源消纳的影响需要进一步的分析。

3 考虑用热舒适度弹性的热负荷模型

在考虑多因素调节采暖热负荷进行运行优化时，应保证室内温度范围符合标准。采用 PMV 指标来评价室内热舒适度。PMV 值为 0 时对应人体的最佳热舒适状态，PMV 指标在 ± 0.5 之间波动时，用户不会感觉到温度变化的明显差异^[17]；而现行规范规定 PMV 处于 ± 1 之间时，也可满足冬季室内用户的用热舒适度需求^[18]。PMV 指标简化表示为

$$\lambda_{PMV} = 2.43 - \frac{3.76(T_s - T_{in})}{M(I_{cl} + 0.1)} \quad (11)$$

式中： M 为人体能量代谢率； I_{cl} 为服装热阻； T_s 为人体在热舒适状态下的平均皮肤温度，取 33.5°C ； T_{in} 为采暖建筑物内人体周围空气温度。

PMV 指标主要与室内温度相关，而室内温度的变化受到供暖功率和室外温度的影响，可表示为

$$T_{in,t+1} = T_{in,t} e^{-\Delta t/\tau} + (RQ_t + T_{out,t})(1 - e^{-\Delta t/\tau}) \quad (12)$$

$$\tau = R \cdot C \quad (13)$$

式中： $T_{in,t}$ 、 $T_{out,t}$ 分别为 t 时段建筑物的室内外温度； τ 为热惯性常数； R 为建筑物热阻； C 为建筑物比热容； Q_t 为 t 时段的热负荷。

由式(12)得到由室内温度变化计算热负荷的关系表达式为

$$Q_t = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{T_{in,t+1} - e^{-\Delta t/\tau} T_{in,t}}{1 - e^{-\Delta t/\tau}} - T_{out,t} \right) \quad (14)$$

在区域供热系统中, 影响热负荷的主要因素包括室外温度、自然风以及太阳辐射^[19-20]。定义室外气象综合温度, 将风速、太阳辐射量对建筑的影响转化为室外温度对建筑影响的等效值。室外气象综合温度的表达式为

$$T_{com} = T_{out} + T_{wind} + T_{solar} \quad (15)$$

$$t_{wind} = \begin{cases} 0, & v < 2 \text{ m/s} \\ -(v-2), & 2 \leq v < 5 \text{ m/s} \\ -(v-5) \times [3 + 0.2 \times (v-5)] - 3, & 5 \leq v < 10 \text{ m/s} \\ -23, & v > 10 \text{ m/s} \end{cases} \quad (16)$$

$$t_{solar} = \theta R_t \quad (17)$$

式中: T_{out} 为室外温度; T_{wind} 、 T_{solar} 分别为风速、太阳辐射量对建筑温度影响的等效值; R_t 为太阳辐射值; 根据山东地区冬季晴天参考逐时太阳辐射强度, θ 取 $8.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ 。

考虑室外气象综合温度时, 取

$$Q_t = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{T_{in,t+1} - e^{-\Delta t/\tau} T_{in,t}}{1 - e^{-\Delta t/\tau}} - T_{com,t} \right) \quad (18)$$

根据室外温度、采暖标准、采暖面积、建筑类型等信息, 先计算各用户所需热负荷, 求和即可求得计及用热舒适度弹性的某二级网所需热负荷。

4 热电联合优化调度

热电联合调度的关键技术是调度模型的构建和对联合调度模型的求解算法。

4.1 热电联合调度模型的构建

本文所述的考虑供热舒适度的热电联合系统优化调度模型, 旨在利用热负荷的柔性特性寻求满足热电联供系统各约束条件的系统最优调度, 以提高热电联产机组调峰能力, 并减小系统运行成本, 提升光伏消纳能力。

4.1.1 目标函数

考虑煤耗成本, 以全局总能耗成本最小为目标建立目标函数, 并加入弃光惩罚。

$$\min F = \sum_{t=1}^T [C_{coal,t} + C_{pv,t}] \quad (19)$$

式中, $C_{coal,t}$ 、 $C_{pv,t}$ 分别为 t 时段煤耗成本和弃光成本。

煤耗成本为

$$C_{coal,t} = c_{coal} \left(\sum_{n=1}^N F_{n,chn,t} + \sum_{m=1}^M F_{m,con,t} \right) \quad (20)$$

热电机组、纯凝机组的耗量特性方程分别为

$$F_{chn} = b_0 + b_1 P + b_2 D + b_3 P^2 + b_4 PD + b_5 D^2 \quad (21)$$

$$F_{con} = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 \quad (22)$$

式中: c_{coal} 为煤炭价格; P 为发电功率; D 为供热抽汽量; $a_0 - a_2$ 、 $b_0 - b_5$ 为拟合系数。

弃光惩罚为

$$C_{pv,t} = \delta \sum_{t=1}^T (P_{pv,t}^{re} - P_{pv,t}) \quad (23)$$

式中: $P_{pv,t}^{re}$ 为预测光伏发电功率; $P_{pv,t}$ 为实际光伏出力; δ 为弃光惩罚因子。

4.1.2 约束条件

1) 电热功率平衡约束

电功率平衡约束如式(24)所示。

$$\sum_{n=1}^N P_{n,e,t} + \sum_{m=1}^M P_{m,con,t} + P_{pv,t} = P_{e,t} + A \cdot \sum_{k=1}^K P_{k,EB,t} \quad (24)$$

式中: N 为热电机组数量; $P_{m,con,t}$ 为 t 时段纯凝机组 m 的电出力; M 为纯凝机组数量; $P_{e,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 分别为 t 时段区域电网电负荷和光伏出力; $P_{k,EB,t}$ 为 t 时段电锅炉 k 消耗的电功率; K 为电锅炉数量。

热功率平衡约束如式(25)所示。

$$\sum_{n=1}^N Q_{n,h,t} + A \cdot \sum_{k=1}^K Q_{k,EB,t} = \sum_{j=1}^J Q_{j,L,t} \quad (25)$$

式中: J 为热电厂所带的换热站总数; $Q_{j,L,t}$ 为 t 时段换热站 j 的热负荷。

当换热站装设热泵时, 系统相应的电热平衡约束与装设电锅炉时类似。

2) 运行约束

热电机组运行出力约束如第 1 节中所示。纯凝机组、电锅炉、热泵需满足出力约束式(26)一式(28)。

$$\underline{P}_{m,con,t} \leq P_{m,con,t} \leq \bar{P}_{m,con,t} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{EB,t} \leq \bar{P}_{EB,t} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{HP,t} \leq \bar{P}_{HP,t} \quad (28)$$

式中: $\underline{P}_{m,con,t}$ 、 $\bar{P}_{m,con,t}$ 分别为纯凝机组 m 的最小、最大出力; $\bar{P}_{EB,t}$ 、 $\bar{P}_{HP,t}$ 为电锅炉、热泵的最大电功率。

机组爬坡约束如式(29)和式(30)所示。

$$-P_n^d \leq P_{n,e,t} - P_{n,e,t-1} \leq P_n^r \quad (29)$$

$$-P_m^d \leq P_{m,con,t} - P_{m,con,t-1} \leq P_m^r \quad (30)$$

式中: P_n^r 、 P_n^d 分别为热电机组 n 的最大上坡功率和最大下坡功率; P_m^r 、 P_m^d 分别为纯凝机组 m 的最大上坡功率和最大下坡功率。

3) 室内温度约束

北方寒冷地区采暖时期室内温度应满足

$$18 \leq T_{in} \leq 24 \quad (31)$$

同时需满足 PMV 值限制, 即

$$-1 \leq \lambda_{PMV} \leq 1 \quad (32)$$

4.2 热电联合调度的求解算法

热电联合调度模型包含多个等式约束及不等式约束, 同时发电机组的电出力与热出力相互影响, 存在电热耦合, 是复杂的非线性模型。模型中目标是对一天内发电机组热电出力、纯凝机组电出力、电锅炉或空气源热泵热出力、光伏出力进行优化。在满足电、热平衡约束下, 使运行成本最小化。采用粒子群算法进行求解。

采用罚函数处理约束条件, 各粒子的适应度函数 F 为

$$F = f + mp \quad (33)$$

式中: f 为原目标函数; m 为罚函数权重; p 为罚函数值。

迭代更新粒子速度和位置时, 通过对粒子进行约束自调节^[21]限制算法搜索范围, 仅在满足约束条件的可行解中寻优, 以提高模型求解速度。即对超过不等式约束限值的 x_i , 将其控制在上/下限上; 对不满足等式约束的粒子, $f(x_1, x_2, \dots, x_i) \neq a$, 根据其违反等式约束的大小和调节裕度对粒子位置进行调节。例如当 $f(x_1, x_2, \dots, x_i) > a$ 时, 每个粒子调节为

$$x_i' = x_i - \frac{x_i^{\text{down}}}{\sum x_i^{\text{down}}} [f(x_1, x_2, \dots, x_i) - a] \quad (34)$$

$$x_i^{\text{down}} = x_i - x_i^{\text{min}} \quad (35)$$

式中: x_i^{down} 为 x_i 向下调节裕度; x_i^{min} 为 x_i 下限。

为满足算法对寻优能力的要求, 避免调度结果陷入局部最优解, 提高算法计算稳定性, 引入时变权重对速度更新的惯性权重 ω 进行调整。第 n 次迭代时惯性权重取值为

$$\omega_n = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{gen}_{\max}} n \quad (36)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为惯性权重上下限; gen_{\max} 为算法最大迭代次数。

算法的求解流程如图 2 所示。

5 算例分析

以某区域热电联合系统^[21]为例, 系统包括 1 座热电厂、1 座火电厂, 热电厂、火电厂与光伏出力共同供给电能。热电厂承担采暖热负荷, 热力系统包含 9 个换热站, 在距离热电厂较远的换热站配置

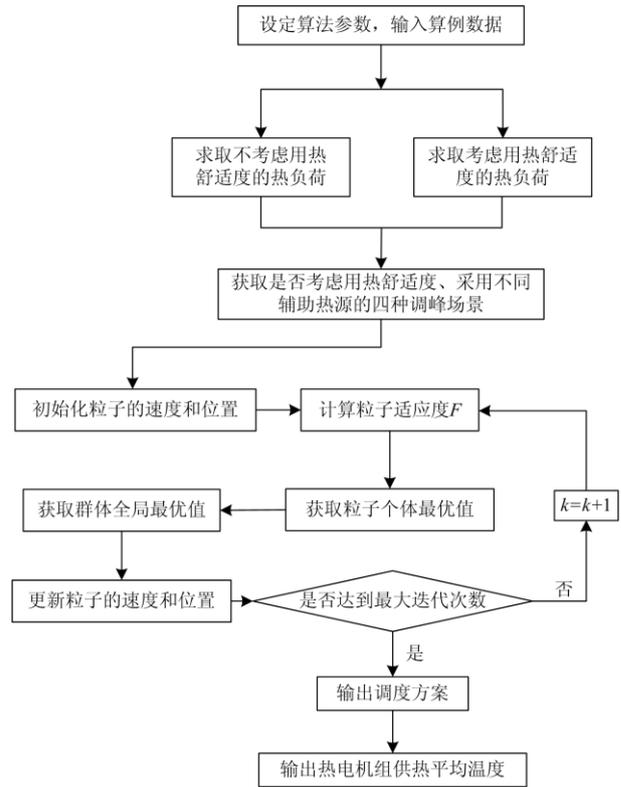


图 2 热电联合调度的粒子群优化算法流程图

Fig. 2 Flow chart of particle swarm optimization algorithm for dispatch of combined heat-power system

4 个容量为 35 MW 的电锅炉, 其他算例数据详见文献^[21]。

在四种场景下求解热电联供问题:

场景 1: 换热站配置电锅炉, 不考虑用热舒适度, 以实际室外温度作为采暖热负荷计算指标。

场景 2: 换热站配置电锅炉, 综合考虑多种因素影响的用热舒适度, 以室外综合气象温度作为采暖热负荷计算指标。

场景 3: 换热站配置热泵, 不考虑用热舒适度, 以实际室外温度作为采暖热负荷计算指标。

场景 4: 换热站配置热泵, 考虑用热舒适度, 以室外综合气象温度作为采暖热负荷计算指标。

5.1 采暖热负荷分析

本文中取山东某地区冬季典型日晴天室外气象参数, 获得逐时室外气象综合温度如图 3 所示。

分别以实际室外温度和室外综合气象温度作为采暖热负荷计算指标, 获取热负荷曲线如图 4 所示。

比较曲线可以看出采用室外气象综合温度修正热负荷的影响。在 7—9 h, 太阳辐射量较低, 室外气象综合温度较低, 为了保证室内人体的热舒适,

热负荷下调缓慢; 在 11~13 h, 太阳辐射量达到一天中的高峰时段, 热用户在晴天光照下常采取减少室内穿着、开窗通风等行为获取室内热平衡, 此时下调热负荷更能满足热用户的热舒适度需求; 在 14—17 h, 太阳辐射量减少, 风力增强, 室外气象综合温度回落, 热负荷回升。太阳辐射与风力共同作用, 在保证室内采暖温度满足供热规定的前提下, 更好地体现用户的实际热舒适需求。

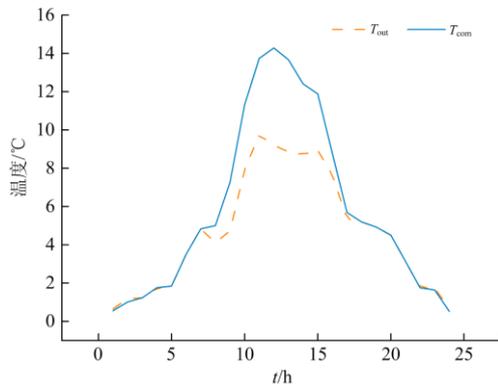


图3 逐时室外气象综合温度

Fig. 3 Weather integrated temperature for each moment

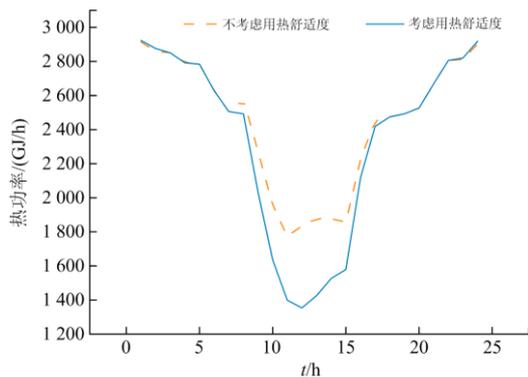


图4 两种方案下的供暖负荷曲线

Fig. 4 Heating load curve under two scenes

5.2 调度仿真

分别基于四种调度场景求解热电联供问题, 光伏出力、机组电热出力和煤耗量如图 5—图 8 所示。

5.3 调度结果分析

5.3.1 机组电、热出力

热电厂与光伏出力共同供给电负荷与电制热设备用电, 达到了电平衡。由图 6 可以看出, 0—7 h 和 17—24 h 阶段, 光伏无出力, 热电厂处于高峰稳发电, 供给的热负荷也处于高峰稳供。8—17 h 为光伏出力高峰时段, 等效电负荷处于低谷, 对应的热电厂发电量减少。在不同调度模式下考虑热负荷与换电站辅助热源的不同, 机组的电热出力有所不同。

比较场景 1 与场景 2, 由于热负荷的下调, 场景 2 比场景 1 的机组电出力有所降低, 热电机组的电出力与机组总电出力的降幅分别达到了 3.93%、2.81%; 在机组热出力方面, 考虑了用热舒适度弹性的场景 2 下, 热电机组出力较低。9—15 h 阶段, 电锅炉开启, 与热电机组共同出力供给采暖热负荷。

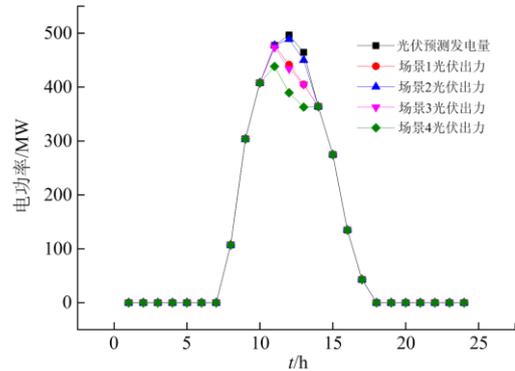


图5 光伏总额以及不同调度场景下的光伏出力

Fig. 5 Photovoltaic power under different scenes

and total photovoltaic power

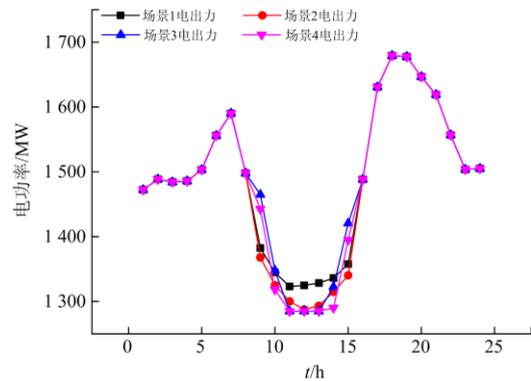


图6 不同调度场景下的机组电出力

Fig. 6 Power output under different scenes

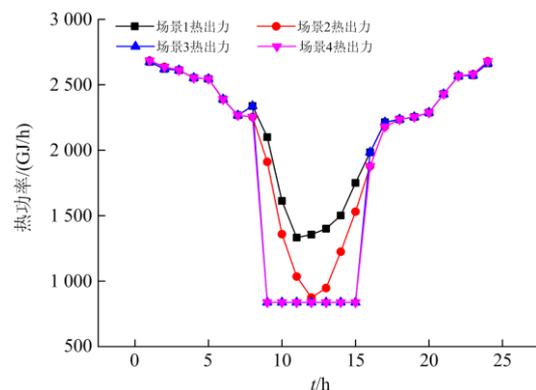


图7 不同调度场景下的机组热出力

Fig. 7 Thermal output under different scenes

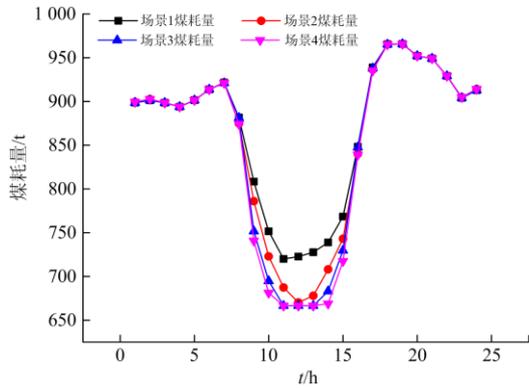


图8 不同调度场景下的煤耗量

Fig. 8 Amount of coal consumption under different scenes

场景4与场景3相比,9—10h、14—15h的电出力有所降低,机组热出力无明显变化。由于空气源热泵的电热转换效率高于电锅炉,9—15h阶段,空气源热泵开启,系统的等效电负荷比配设电锅炉的场景1、2低,同时热泵的热出力高于场景1、2的电锅炉热出力,热电机组热出力达到最小。

5.3.2 平均供热温度

场景3、4对应的热负荷与供热情况分别与场景1、2相同,以场景1、2为例分析考虑室外气象综合温度对供热温度的影响。场景1调度下各时段的平均供热温度和对应的PMV值如表1所示。

表1 场景1中各时段的平均供热温度和PMV值

Table 1 PMV and average heating room temperature of each period of 1 scene

时段	供热温度/℃	PMV 值	时段	供热温度/℃	PMV 值
1	21.90	-0.16	13	20.43	-0.49
2	21.81	-0.18	14	20.44	-0.49
3	21.81	-0.18	15	20.42	-0.49
4	21.72	-0.20	16	20.58	-0.46
5	21.71	-0.20	17	20.94	-0.38
6	21.41	-0.27	18	20.94	-0.38
7	21.16	-0.33	19	20.95	-0.37
8	21.26	-0.30	20	21.02	-0.36
9	21.17	-0.32	21	21.22	-0.31
10	20.60	-0.45	22	21.41	-0.27
11	20.29	-0.52	23	21.40	-0.27
12	20.37	-0.50	24	21.87	-0.17

由表1可见,场景1各时段供热舒适度指标PMV均处于±0.52之间,在此条件下人们感觉不到明显的温度变化。结合实际天气情况,考虑太阳辐射对建筑热动态的影响,柔性热负荷具有较大的调

节潜力。

由仿真结果,得到场景2调度下各时段的平均供热温度和相对应的PMV值如表2所示。

表2 场景2中各时段的平均供热温度和PMV值

Table 2 PMV and average heating room temperature of each period of 1 scene

时段	供热温度/℃	PMV 值	时段	供热温度/℃	PMV 值
1	21.90	-0.16	13	19.84	-0.62
2	21.82	-0.18	14	20.04	-0.58
3	21.81	-0.18	15	20.11	-0.56
4	21.72	-0.20	16	20.63	-0.45
5	21.71	-0.20	17	20.91	-0.38
6	21.41	-0.27	18	20.94	-0.38
7	21.16	-0.33	19	20.95	-0.37
8	21.14	-0.33	20	21.02	-0.36
9	20.85	-0.40	21	21.22	-0.31
10	20.24	-0.53	22	21.41	-0.27
11	19.83	-0.63	23	21.41	-0.27
12	19.72	-0.65	24	21.91	-0.16

由表2可见,场景2的供热舒适度指标PMV均处于±0.65之间,符合采暖标准规定,相较于场景1,PMV值有一定的降低,但在非正午时段室内气温仍能维持在20℃左右。室内低温19.5~19.8℃出现在11—13h阶段,在北方晴朗冬季,受太阳辐射得热影响,采暖温度适量下调能保证用户的用热舒适度。8—11h阶段,采暖温度的下调速度较平缓,14—17h阶段,温度回升,并在17—18h达到21℃。

综上,计及室外气象综合温度求得的热负荷可以满足居民对采暖用热的需求。

5.3.3 光伏上网量及煤耗成本

结合图5和图8,配置电锅炉作为辅助热源时,采用室外气象综合温度修正后光伏上网功率提高,基本实现了全额消纳,调整了系统的能源结构,降低了系统的燃料成本。表3中给出了四种场景下的光伏利用率、PMV范围及总煤耗量。

表3 四种场景下的光伏利用率、PMV范围与煤耗量

Table 3 Photovoltaic utilization, range of PMV and total coal consumption of four scenes

序号	光伏利用率/%	PMV 范围	煤耗量/t
场景1	96.26	±0.52	20 814.02
场景2	99.28	±0.65	20 558.95
场景3	95.82	±0.52	20 432.18
场景4	91.87	±0.65	20 367.19

配置电锅炉作为辅助热源时, 场景 1、2 相比, 计及用热舒适度弹性的优化调度场景下光伏利用率提高了 3.02%, 用热舒适度在用户接受范围内略微降低, 燃料成本比原场景降低了 1.23%。

配置空气源热泵作为辅助热源时, 场景 3 和场景 4 的燃料成本比原场景分别降低了 1.83% 和 2.15%。在光伏利用率方面, 空气源热泵工作期间均未达到容量上限, 等效电负荷降低, 下调热负荷对调峰的作用并没有显现。

综上, 考虑用热舒适度的热负荷调节, 一方面挖掘了热负荷侧需求弹性, 另一方面提高了系统的调峰能力。两者协同作用, 在用户接受范围内牺牲了一部分用热舒适度, 为光伏提供了上网空间。配置电锅炉作为辅助热源时, 基本实现了光伏全额消纳; 而配置热泵时需要配合储热等手段以达到调峰目的。

6 结论

本文考虑了影响用热舒适度的气象因素, 建立考虑用热舒适度弹性的热电联合优化调度模型, 实现降低燃料成本、促进光伏消纳的优化调度。

1) 用户在用热舒适度弹性范围内通过热舒适度下调, 为光伏出力高峰阶段提供弹性上网空间, 可以有效提高光伏发电的消纳水平(约 3.02%), 同时降低了发电机组的燃料成本(约 1.23%)。

2) 换热站配置电锅炉时, 基本实现了全额消纳; 而配置热泵时, 由于电热转换效率的提高, 考虑室外气象综合温度的热负荷调节需要配合储热等手段进行调峰。

参考文献

- [1] LI Z, WU W, WANG J, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 480-492.
- [2] 张冲, 胡林献, 胡佳. 发电机组比重及热负荷对风电消纳率影响的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(23): 120-125.
ZHANG Chong, HU Linxian, HU Jia. Research on the impact of the proportion of thermal power generating units and heat load on the wind power accommodation rate[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(23): 120-125.
- [3] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3286-3291.
LI Jiajia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3286-3291.
- [4] DOU Chunxia, ZHOU Xiaohan, ZHANG Tengfei, et al. Economic optimization dispatching strategy of microgrid for promoting photoelectric consumption considering cogeneration and demand response[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(3): 557-563.
- [5] GAO Yaokui, ZENG Deliang, ZHANG Lixia, et al. Research on modeling and deep peak regulation control of a combined heat and power unit[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 91546-91557.
- [6] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 基于多能互补的电/热综合需求响应[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 480-489.
XU Hang, DONG Shufeng, HE Zhongxiao. Electro-thermal comprehensive demand response based on multi-energy complementarity[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 480-489.
- [7] 王婉璐, 杨莉, 王蕾, 等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(21): 45-52.
WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering heat storage characteristic of heating network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(21): 45-52.
- [8] LIN Chenhui, WU Wenchuan, WANG Bin, et al. Joint commitment of generation units and heat exchange stations for combined heat and power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1118-1127.
- [9] 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.
- [10] 郭威, 杨鹏, 孙胜博, 等. 计及生物质能的热电联供系统经济运行优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 88-96.
GUO Wei, YANG Peng, SUN Shengbo, et al. Optimization strategy of a rural combined heat and power system considering biomass energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 88-96.
- [11] ALI M, DEGEFA M Z, HUMAYUN M, et al. Increased utilization of wind generation by coordinating the demand response and real-time thermal rating[J]. *IEEE Transactions*

- on Power Systems, 2015, 31(5): 3737-3746.
- [12] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yizhong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [13] BASHIR A A, LUND A, POURAKBARI-KASMAEI M, et al. Minimizing wind power curtailment and carbon emissions by power to heat sector coupling—a Stackelberg game approach[J]. IEEE Access, 2020, 8: 211892-211911.
- [14] 程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 160-168.
CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 160-168.
- [15] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [16] 徐姗姗, 郭通, 王月, 等. 大规模火电灵活性改造背景下电-热能源集成系统优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 27-37.
XU Shanshan, GUO Tong, WANG Yue, et al. Optimal scheduling of electro-thermal energy integrated system under the background of flexibility retrofit of thermal power unit[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 27-37.
- [17] 马红明, 刘林青, 谢海鹏, 等. 计及综合需求响应的电-热综合能源系统分布式光伏最大接入容量评估[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 23-30.
MA Hongming, LIU Linqing, XIE Haipeng, et al. Maximum access capacity assessment of distributed photovoltaic in integrated electric-thermal energy system considering integrated demand response[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 23-30.
- [18] 徐洪涛, 李蒙沂, 李国强, 等. 跨临界循环二氧化碳热泵型热水器的应用研究[J]. 制冷与空调, 2001(1): 54-57.
- XU Hongtao, LI Mengyi, LI Guoqiang, et al. Application of transcritical cycle carbon dioxide heat pump water heater[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2001(1): 54-57.
- [19] 宋杰, 张卫国, 李树鹏, 等. 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 80-87.
SONG Jie, ZHANG Weiguo, LI Shupeng, et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 80-87.
- [20] 林俐, 顾嘉, 王钤. 面向风电消纳的考虑热网特性及热舒适度弹性的电热联合优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3648-3661.
LIN Li, GU Jia, WANG Qian. Optimal dispatching of combined heat-power system considering characteristics of thermal network and thermal comfort elasticity for wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3648-3661.
- [21] 袁闪闪. 集中供热系统的热动态特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
YUAN Shanshan. Research on dynamic performance of centralized heat-supply system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [22] WESTPHAL F S, LAMBERTS R. The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(8): 847-854.
- [23] 邵世圻, 戴赛, 胡林献, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 24-30.
SHAO Shiqi, DAI Sai, HU Linxian, et al. Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 24-30.

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-10-20

作者简介:

董彧彤(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为多能源系统的优化运行; E-mail: yours_d@126.com

王艳松(1965—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电网的优化规划与节能技术、电网故障诊断与配电自动化、电力负荷预测、电能质量分析与谐波治理等。E-mail: wys91517@163.com

(编辑 张爱琴)