

文章编号: 1006-2467(2023)07-0835-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.056

# 计及需求响应和风力发电消纳的电-热系统低碳优化调度

刘子旭, 米 阳, 卢长坤, 符 杨, 苏向敬

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 针对热电联产机组存在热电耦合性大、火电机组碳排放量高和负荷侧资源灵活性未充分挖掘等问题, 建立计及负荷需求响应和风力发电消纳的电-热系统低碳调度模型. 首先, 在源侧考虑增加储热和碳捕集设备, 同时在负荷侧考虑电价型需求响应和供暖建筑热负荷惯性. 然后, 以机组运行成本、碳交易成本和弃风惩罚成本总和为目标函数, 考虑相关约束, 并调用 Gurobi 求解器进行求解. 最后, 针对不同案例下系统的经济成本、风力发电消纳量和碳排放速率等方面进行算例对比分析, 证明该调度策略在提高系统风力发电消纳能力的同时兼顾经济性和低碳性.

**关键词:** 碳捕集; 需求侧响应; 热负荷惯性; 风力发电消纳; 低碳经济

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

## Low-Carbon Optimal Dispatch of Electric-Thermal System Considering Demand Response and Wind Power Consumption

LIU Zixu, MI Yang, LU Changkun, FU Yang, SU Xiangjing

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To solve the problems of large thermoelectric coupling in combined heat and power, high carbon emission of thermal power units, and insufficient resource flexibility on the load side in cogeneration units, a low-carbon dispatching model is established for the electricity-heat system. First, heat storage and carbon capture equipment is added on the source side while the demand response of electricity price and the heat load inertia of heating buildings are considered on the load side. Then, the sum of unit operating cost, carbon transaction cost and wind abandonment penalty cost are taken as the objective function with relevant constraints and solved by calling Gurobi solver. Finally, a comparative analysis of the economic cost, wind power consumption, and carbon emission rate of the system in different cases is conducted, which shows that the dispatching strategy proposed in this paper can improve the wind power consumption capacity while taking economy and low carbon emission into account.

**Key words:** carbon capture; demand-side response; thermal load inertia; wind power consumption; low-carbon economy

能源危机和环境问题日趋严峻,“双碳”目标下  
新能源消纳和低碳减排成为当前研究的热点<sup>[1-3]</sup>. 我

国有着丰富的风能资源,且全国风电场的总装机容量正逐年增长,风能发电有着非常可观的发展前景,

收稿日期: 2022-03-05 修回日期: 2022-03-30 录用日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61873159), 上海市自然科学基金(22ZR1425500)资助项目

作者简介: 刘子旭(1996-), 硕士生, 从事综合能源优化调度等研究.

通信作者: 米 阳, 博士, 教授; E-mail: miyangmi@163.com.

但其反调峰特性使之难以被充分利用. 我国“三北”地区拥有大规模风电场和高比例热电联产(CHP)机组. 在冬季供暖期, CHP 机组“以热定电”的运行方式严重影响机组的调峰能力, 加剧该地区的弃风问题<sup>[4-5]</sup>. 为此, 设计电力系统经济调度策略提高风力发电(简称风电)消纳和降低碳排放具有重要意义.

近年来, 众多学者针对考虑源侧的 CHP 调度模型进行了深入研究. 针对 CHP 机组强热电耦合的特点, 文献[6]中提出加装补燃装置以提高余热锅炉供热出力, 实现对 CHP 热电比的灵活调节, 结合治污费用建立区域综合能源系统多目标优化模型. 文献[7]中提出一种储热电混合储能系统的供热模型, 并验证其在多储能协调运行模式下提升风电消纳的能力. 传统火电机组是最主要的基荷机组, 碳排放量也相对更多, 对其配置碳捕集设备可在实现低碳运行的同时增加风电消纳量. 文献[8]中在传统火电机组中考虑碳捕集设备与风电预测不确定性, 验证了碳捕集设备在有效降低碳排放强度的同时还能提升风电消纳能力. 文献[9]中将蓄热式电采暖与风电消纳结合, 证明蓄热式电采暖从电源侧的角度提高了系统的风能消纳水平. 上述文献验证了源侧模型优化可以提升风电消纳能力, 而负荷侧优化提升风电消纳能力还需要进一步深入研究.

电负荷需求响应可有效调节用户的用电方式, 实现对电负荷的削峰填谷. 文献[10]中对分时电价需求响应时段划分和价格制定的方法进行分析, 并对用户用电方式的分析方法进行归类. 文献[11-12]中将分时电价需求响应引入综合能源系统, 分别结合源侧碳捕集和储能设备进行分析, 仿真结果表明联合优化模型能很好地兼顾经济性和低碳性, 为其后续发展打下基础. 热负荷的灵活性调节也是改变 CHP 机组电出力的关键因素, 挖掘热负荷调节潜力对实现系统经济低碳运行有着重要的作用. 文献[13]中在 CHP 系统下对热网储放热特性和供热区域热惯性进行分析, 挖掘热负荷资源对室内外温度的弹性变化以促进系统的风电消纳.

综上所述, 目前的研究大多关注对源侧或负荷侧单独优化, 而源荷两侧联合优化的研究相对较少. 此外, 尚无研究在源侧考虑储热和碳捕集装置, 并在负荷侧考虑电负荷需求响应和供暖建筑热负荷惯性. 因此, 以提高风电消纳量和实现系统经济低碳运行目标, 首先分析在源侧和负荷侧提高风电消纳和降低碳排放的原理并分别搭建源侧和负荷侧的模型; 然后构建综合考虑低碳、风电消纳和系统经济运

行的优化调度模型; 最后通过仿真对比验证本文模型在提高风电消纳和降低碳排放方面的优越性.

## 1 计及储热和碳捕集设备风电消纳

在高比例风电接入的工况下, 传统火电机组和 CHP 机组都存在灵活性不足的问题, 从而无法消纳更多的风电, 因此需要进行灵活性改造<sup>[14-15]</sup>.

### 1.1 配置储热设备机组工作机理分析

#### 1.1.1 含储热设备 CHP 机组弃风消纳分析

CHP 机组主要分为背压式和抽汽式两种, 以抽汽式为例对其安装储热设备后的风电消纳能力进行分析. 如图 1 所示, CHP 机组的运行区域从原来的 ABCD 变成 AEF GCHI, 在相同的热出力  $P_h$  下, 电出力的范围由 1~2 点对应的  $[P_{he1, \min}, P_{he1, \max}]$  调整为 3~4 点对应的  $[P_{he2, \min}, P_{he2, \max}]$ . 在高比例风电接入的地区消纳风电时, 未装储热设备的机组电出力运行在点 2 对应的  $P_{he1, \min}$ , 而在储热设备的作用下由点 2 移动到点 4, 对应的电出力由  $P_{he1, \min}$  变为  $P_{he2, \min}$ , 此时电出力的下降量为进一步消纳风电提供更多的上网容量. 图中:  $P_{e, \max}$ 、 $P_{e, \min}$  分别为 CHP 机组电功率出力的最大、最小值;  $c_v$  为在一定进汽量下, 多抽取单位供热热量时电功率的减小量;  $c_m$  为电、热功率的弹性系数;  $P_{h, \text{med}}$  为热电特性处于转折点时的热功率;  $P_{h1, \max}$ 、 $P_{h2, \max}$  分别为无储热与含储热 CHP 机组热功率的最大值.

#### 1.1.2 含储热装置 CHP 机组模型

(1) CHP 机组平衡约束:

$$P_{Ghi,t} = P_{i,t}^{\text{CHP}} + c_{vi} P_{hi,t} \quad (1)$$

式中:  $P_{Ghi,t}$  为纯凝工况下热电机组的发电功率;  $P_{i,t}^{\text{CHP}}$  为纯凝工况下热电机组的净发电功率;  $c_{vi}$  为机组常数参数;  $P_{hi,t}$  为纯凝工况下热电机组的热功率;  $i$ 、 $t$  分别代表机组编号和时间.

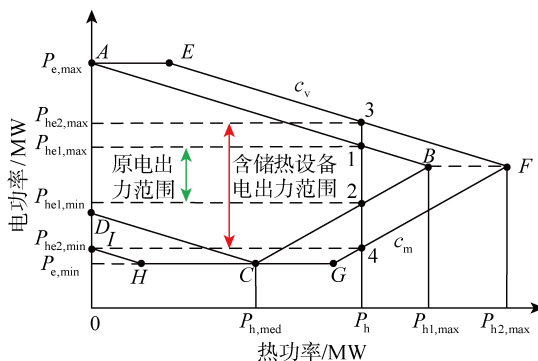


图 1 含储热的 CHP 机组风电消纳分析图

Fig. 1 Wind power consumption analysis of CHP units with heat storage

(2) CHP 机组热、电出力约束<sup>[16]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{Ghi},\min} - c_{vi}P_{\text{hi},t} &\leq P_{i,t}^{\text{CHP}} \leq P_{\text{Ghi},\max} - c_{vi}P_{\text{hi},t}, \\ 0 &\leq P_{\text{hi},t} \leq P_{\text{hi},\text{med}} \\ c_{mi}P_{\text{hi},t} &\leq P_{i,t}^{\text{CHP}} \leq P_{\text{Ghi},\max} - c_{vi}P_{\text{hi},t}, \\ P_{\text{hi},\text{med}} &\leq P_{\text{hi},t} \leq P_{\text{hi},\max} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{Ghi},\min}$ 、 $P_{\text{Ghi},\max}$  分别为纯凝工况下热发电机组最大、最小的发电功率;  $c_{mi}$  为机组  $i$  电、热功率的弹性系数;  $P_{\text{hi},\text{med}}$  为机组  $i$  热电特性处于转折点时的热功率;  $P_{\text{hi},\max}$  为热功率的最大值。

(3) 储热设备的容量与储、放热速率约束:

$$\left. \begin{aligned} S_t &= \eta^h S_{t-1} + (P_{\text{hc},t} - P_{\text{hf},t})\Delta t, \\ 0 &\leq S_t \leq S_{\max} \\ 0 &\leq P_{\text{hf},t} \leq \min(P_{\text{hf},\max}, S_{\max} - S_t) \\ 0 &\leq P_{\text{hc},t} \leq \min(P_{\text{hc},\max}, S_t) \\ \sum_{t=1}^T (P_{\text{hf},t} - P_{\text{hc},t}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $S_t$  为储热设备的热量值;  $\eta^h$  为储热设备每小时热量损耗系数;  $S_{\max}$  为储热设备中的最大储热量;  $\Delta t$  为以小时为单位的调度间隔;  $P_{\text{hc},t}$ 、 $P_{\text{hf},t}$  为储热设备每小时存、放热量的功率;  $P_{\text{hc},\max}$ 、 $P_{\text{hf},\max}$  为储热设备每小时存、放热量的最大功率;  $T$  为一个时长为 24 h 的调度周期。

## 1.2 配置碳捕集设备机组工作机理

**1.2.1 碳捕集机组对弃风消纳分析** 如图 2 所示, 可通过调节碳捕集设备的运行能耗间接调节机组净出力的大小, 使火电机组的净出力调节范围更加灵活<sup>[17-18]</sup>。因此, 与运行范围相对固定的传统火电机组相比, 碳捕集机组在相同的旋转备用要求下具有更低的机组净出力, 为进一步消纳风电提供更多的上网容量。且多消纳的风电可供于碳捕集设备使用, 在实现弃风消纳的同时也降低了系统的碳排放量。图中:  $P_{\text{Ji},t}$  为火电机组净发电功率。

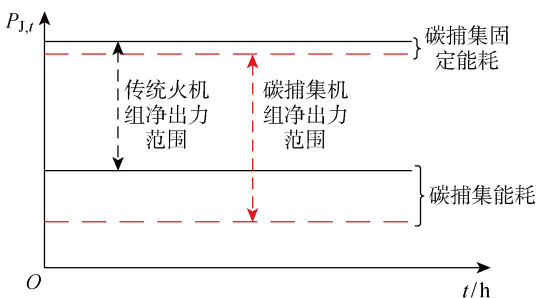


图 2 碳捕集机组风电消纳分析图

Fig. 2 Analysis of wind power consumption of carbon capture units

**1.2.2 含碳捕集设备的机组模型** 碳捕集机组运行时须遵守如下约束关系:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{Gi},t} &= P_{\text{Ji},t} + P_{\text{Yi},t} + P_{\text{Di}} \\ E_{\text{Pi},t} &= E_{\text{Gi},t} P_{\text{Gi},t} \Delta t \\ E_{\text{CO}_2,i,t} &= \omega_{i,t} \theta E_{\text{Pi},t} \\ 0 &\leq \omega_{i,t} \leq \omega_{\max} \\ P_{\text{Yi},t} &= \tau_i E_{\text{CO}_2,i,t} \\ E_{\text{Ji},t} &= E_{\text{Pi},t} - E_{\text{CO}_2,i,t} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{Gi},t}$  为火电机组发电功率;  $P_{\text{Ji},t}$  为第  $i$  台火电机组净发电功率;  $P_{\text{Yi},t}$  为碳捕集设备的运行损耗功率;  $P_{\text{Di}}$  为碳捕集设备的固定维持损耗功率;  $E_{\text{Pi},t}$  为火电机组的碳排放总量;  $E_{\text{Gi},t}$  为火电机组碳排放强度;  $E_{\text{CO}_2,i,t}$  为碳捕设备捕集到  $\text{CO}_2$  的量;  $\omega_{i,t}$  为分流比系数;  $\theta$  为碳捕集设备的捕碳水平;  $\omega_{\max}$  为最大分流比限值;  $\tau_i$  为碳捕集设备捕集单位  $\text{CO}_2$  所消耗的功率;  $E_{\text{Ji},t}$  为碳捕集机组的净碳排放量。

## 2 需求侧响应与热负荷惯性调度模型

风电出力的反调峰特性是产生弃风的主要原因, 利用需求响应对电负荷侧削峰填谷可以在提高系统经济性的同时促进谷时系统风电消纳的能力<sup>[19]</sup>。供暖建筑热负荷惯性通过对热负荷的灵活性调节, 使 CHP 机组在电负荷低谷时减少热出力, 间接降低机组的电出力水平, 为进一步消纳风电提供更多的上网容量。

### 2.1 电负荷需求响应

**2.1.1 分时电价用户响应矩阵** 考虑电负荷的峰谷特性, 将电负荷按峰平谷不同时段划分, 利用用户需求弹性矩阵计算分段后的电负荷响应功率和电价的变化量, 模型如下所示:

$$\begin{bmatrix} L_{\text{F}} \\ L_{\text{P}} \\ L_{\text{G}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\text{F0}} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\text{P0}} & 0 \\ 0 & 0 & L_{\text{G0}} \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \delta p_{\text{F}}/p_{\text{F0}} \\ \delta p_{\text{P}}/p_{\text{P0}} \\ \delta p_{\text{G}}/p_{\text{G0}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\text{F0}} \\ L_{\text{P0}} \\ L_{\text{G0}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{\text{FF}} & e_{\text{FP}} & e_{\text{FG}} \\ e_{\text{PF}} & e_{\text{PP}} & e_{\text{PG}} \\ e_{\text{GF}} & e_{\text{GP}} & e_{\text{GG}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $L_{\text{F0}}$ 、 $L_{\text{P0}}$ 、 $L_{\text{G0}}$  和  $L_{\text{G}}$ 、 $L_{\text{P}}$ 、 $L_{\text{F}}$  分别为需求响应分时电价前、后的峰、平、谷各时段负荷总功率;  $\delta p_{\text{F}}$ 、 $\delta p_{\text{P}}$ 、 $\delta p_{\text{G}}$  分别为需求响应分时电价后峰、平、谷各时段电价的变化量;  $p_{\text{F0}}$ 、 $p_{\text{P0}}$ 、 $p_{\text{G0}}$  别分为引入需求响应分时电价前峰、平、谷各时段的电价, 可看作同一固定电价;  $\mathbf{E}$  为用户需求弹性矩阵, 其中主对角线元素分别为峰时、平时、谷时的自弹性系数, 其余元素代表各时段的交叉弹性系数。

**2.1.2 目标函数** 为保证电负荷各时刻功率更贴近总负荷功率的平均值,定义电负荷峰谷差最小值为

$$\min W = \min \sum_{t=1}^T (P_{L,t} - \bar{P}_d)^2 \quad (8)$$

式中:  $P_{L,t}$  为  $t$  时刻需求响应后的负荷功率;  $\bar{P}_d$  为需求响应前负荷功率的平均值。

### 2.1.3 约束条件

#### (1) 电负荷转移约束.

电负荷的转移功率须满足响应前后总负荷功率保持不变,且每时刻的转移功率须满足转移限值:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_d &= \sum P_{d,t} / T \\ P_{L,t} &= P_{d,t} - P_{cl,t} \\ P_{cl,t} &= P_{Lout,t} - P_{Lin,t} \\ \sum_{t=1}^T P_{Lin,t} &= \sum_{t=1}^T P_{Lout,t} \\ -P_{Lin,max,t} &\leq P_{cl,t} \leq P_{Lout,max,t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $P_{d,t}$  为需求响应优化前各时段的负荷功率;  $P_{cl,t}$  为优化负荷净转输出功率;  $P_{Lin,t}$ 、 $P_{Lout,t}$  分别为优化过程中转入和转出的负荷功率;  $P_{Lin,max,t}$ 、 $P_{Lout,max,t}$  分别为优化过程中转入和转出负荷的最大功率。

#### (2) 电量价格约束:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq p_G \leq p_P \leq p_F \\ p_F &\leq \gamma p_G \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $p_F$ 、 $p_P$ 、 $p_G$  分别为需求响应优化后峰、平、谷时段电价;  $\gamma$  为峰时电价对谷时电价的倍数约束系数。

#### (3) 用户用电方式和电费支出满意度约束.

实行峰平谷分时电价后,用户的用电方式发生改变.为反映实际情况中以追求最小电费增加量为目的的用电方式,还需引入用户用电方式和电费支出满意度的约束<sup>[20]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} 1 - \frac{\int_1^T |P_{L,t} - P_{d,t}| dt}{\int_1^T P_{d,t} dt} &\geq \epsilon_{Lmin} \\ 1 - \frac{\int_1^T (P_{L,t} p_t - P_{d,t} p_{t0}) dt}{\int_1^T P_{d,t} p_{t0} dt} &\geq \epsilon_{pmin} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $p_{t0}$  和  $p_t$  分别为需求响应优化前后的电价;  $\epsilon_{Lmin}$ 、 $\epsilon_{pmin}$  分别为用户用电方式满意度和用户电费支出满意度的最小值。

## 2.2 供暖建筑热负荷惯性

考虑供暖用户对室内温度变化的感知具有延迟性,在保证室内温度变化范围一定和整个调度周期内热功率出力总量不变的前提下,可对各个时段的

供暖热功率出力进行日前的灵活性调度。

供暖建筑热负荷惯性约束中室内温度、室外温度和热负荷功率的关系如下所示:

$$\left. \begin{aligned} T_t^{\text{in}} &= K_1 T_{t-1}^{\text{in}} + K_2 P_{h,t} \Delta T + K_3 T_t^{\text{out}} \\ K_1 &= \frac{c}{c + \mu \Delta T} \\ K_2 &= \frac{\Delta T}{S(c + \mu \Delta T)} \\ K_3 &= \frac{\mu \Delta T}{c + \mu \Delta T} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:  $T_t^{\text{in}}$ 、 $T_t^{\text{out}}$  分别为调度周期内供暖建筑室内、室外的温度值;  $P_{h,t}$  为考虑供暖建筑热负荷惯性的实际热负荷功率;  $\Delta T$  为调度间隔;  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为热惯性约束的特性参数;  $c$  为供暖建筑单位供热面积的比热容;  $\mu$  为供暖建筑单位供热面积在室内外温差下热量的损失值;  $S$  为供暖建筑的总供暖面积。

考虑供暖建筑热负荷惯性时,应保证在室内温度约束范围之内,供暖用户热负荷在整个调度周期内总供热量与不考虑供暖建筑热负荷惯性之前相同,具体如下所示:

$$\sum_{t=1}^T P_{h0,t} \Delta t = \sum_{t=1}^T P_{h,t} \Delta t \quad (13)$$

$$T_{\min}^{\text{in}} \leq T^{\text{in}} \leq T_{\max}^{\text{in}} \quad (14)$$

式中:  $P_{h0,t}$  为考虑供暖建筑热负荷惯性前的热负荷功率;  $T^{\text{in}}$ 、 $T_{\max}^{\text{in}}$ 、 $T_{\min}^{\text{in}}$  分别为供暖建筑室温和其上、下限值。

## 3 计及需求响应的电-热系统低碳模型

构建由风电场、CHP 机组、储热设备、传统火电机组和碳捕集设备组成的电-热系统低碳优化调度模型,具体系统结构图如图 3 所示。

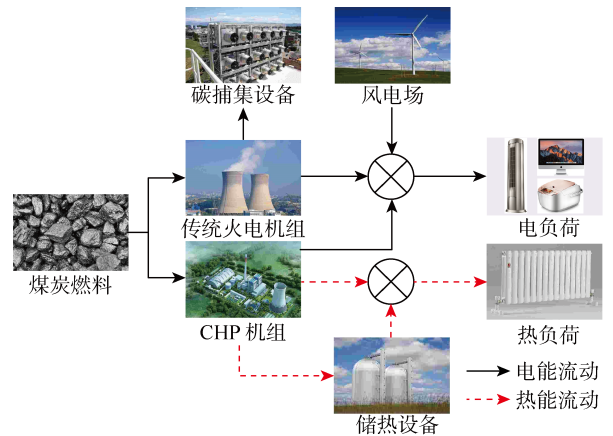


图 3 系统结构图

Fig. 3 System structure

### 3.1 碳交易机制

依据文献[21],由主要发电机组的容量级别和燃料类型的分类确定机组分配碳排放的配额如下:

$$E_{\text{allow}} = \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{t=1}^T (\delta_h P_{Gi,t}) + \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{t=1}^T (\delta_h P_{Ghi,t}) \quad (15)$$

式中:  $\delta_h$  为单位发电功率所获  $\text{CO}_2$  的配额量;  $N_e$  为火电机组的数量;  $N_h$  为 CHP 机组的数量。

各类机组  $\text{CO}_2$  排放量之和如下式所示:

$$E_c = \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{t=1}^T E_{Ji,t} + \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{t=1}^T E_{Ghi,t} \quad (16)$$

式中:  $E_{Ghi,t}$  为 CHP 机组的净碳排放量。

由式(15)和式(16)可得总碳交易成本如下:

$$F_T = \sigma_T (E_c - E_{\text{allow}}) \quad (17)$$

式中:  $\sigma_T$  为每单位  $\text{CO}_2$  所需的交易价格。

### 3.2 目标函数

以火电机组和 CHP 机组的煤炭消耗成本、碳交易成本和弃风惩罚成本最低为目标函数:

$$\begin{cases} \min F = \min(F_{He} + F_{Hh} + F_T + F_Q) \\ F_{He} = \sum_{i=1}^{N_e} \left( \sum_{t=1}^T a_i P_{Gi,t}^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i \right) \\ F_{Hh} = \sum_{i=1}^{N_h} \left( \sum_{t=1}^T a_{hi} P_{Ghi,t}^2 + b_{hi} P_{Ghi,t} + c_{hi} \right) \\ F_Q = \sigma_Q \sum_{t=1}^T (P_{w,t} - P_{s,t}) \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $F_{He}$  为火电机组运行成本;  $F_{Hh}$  为 CHP 机组运行成本;  $F_Q$  为弃风惩罚成本;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  和  $a_{hi}$ 、 $b_{hi}$ 、 $c_{hi}$  分别为火电和 CHP 机组运行成本系数;  $\sigma_Q$  为单位弃风惩罚系数;  $P_{w,t}$  为调度周期内风电的预测功率;  $P_{s,t}$  为调度周期内风电的实际上网功率。

### 3.3 约束条件

(1) 系统电功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_e} P_{Ji,t} + \sum_{i=1}^{N_h} P_{i,t}^{\text{CHP}} + P_{s,t} = P_{L,t} \quad (19)$$

(2) 系统热功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_e} P_{hi,t} + \lambda_t P_{hf,t} - (1 - \lambda_t) P_{hc,t} = P_{h,t} \quad (20)$$

式中:  $\lambda_t$  为储热装置的储、放热控制系数。

(3) 储热设备及碳捕集设备运行约束。储热设备及碳捕集设备运行约束分别如式(4)和式(5)所示。

(4) 机组出力上下限约束:

$$\begin{cases} P_{Gi,\min} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gi,\max} \\ P_{Ghi,\min} \leq P_{Ghi,t} \leq P_{Ghi,\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $P_{Gi,\max}$ 、 $P_{Gi,\min}$  分别为火电机组最大和最小出力。

(5) 机组电出力爬坡约束:

$$\begin{cases} -R_{di}^e \leq P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq R_{ui}^e \\ -R_{di}^h \leq P_{Ghi,t} - P_{Ghi,t-1} \leq R_{ui}^h \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $R_{ui}^e$ 、 $R_{di}^e$  分别为火电机组的上爬坡和下爬坡速率;  $R_{ui}^h$ 、 $R_{di}^h$  分别为 CHP 机组中电出力上爬坡和下爬坡速率。

(6) 机组热出力爬坡约束:

$$-R_{hdi} \leq P_{hi,t} - P_{hi,t-1} \leq R_{hui} \quad (23)$$

式中:  $R_{hui}$ 、 $R_{hdi}$  分别为 CHP 机组中热出力上爬坡和下爬坡速率。

(7) 热备用约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_e} \min\{P_{Ji,\max} - P_{Ji,t}, R_{ui}^e\} + \\ \sum_{i=1}^{N_h} \min\{R_{hui}, P_{Ghi,\max} - c_{vi} P_{hi,t} - P_{i,t}^{\text{CHP}}\} \geq \\ \rho_1 P_{L,t} + \rho_2 P_{w,t} \\ \sum_{i=1}^{N_e} \min\{P_{Ji,t} - P_{Ji,\min}, R_{di}^e\} + \\ \sum_{i=1}^{N_h} \min\{R_{hdi}, P_{i,t}^{\text{CHP}} - c_{mi} P_{hi,t}, \\ P_{i,t}^{\text{CHP}} - P_{Ghi,\min} - c_{vi} P_{hi,t}\} \geq \\ \rho_1 P_{L,t} + \rho_2 P_{w,t} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $P_{Ji,\max}$ 、 $P_{Ji,\min}$  分别为火电机组净输出功率上、下限值;  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为考虑负荷和风电预测不确定性的旋转备用容量系数。

(8) 风电出力上下限约束:

$$0 \leq P_{s,t} \leq P_{w,t} \quad (25)$$

(9) 潮流安全约束。

不考虑调度过程中网络间的损耗,采用传输容量约束为直流潮流约束:

$$-P_{i,j,\max} \leq B_{i,j}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \leq P_{i,j,\max} \quad (26)$$

式中:  $P_{i,j,\max}$  为各节点间的最大传输容量;  $B_{i,j}$  为各节点间的电纳;  $\theta_{i,t}$ 、 $\theta_{j,t}$  分别为不同节点电压相角。

本文不考虑供热机组与热负荷间的约束,可将所有供热机组和热负荷看作处于同一节点来进行研究。

## 4 算例分析

采用改进的 IEEE30 节点电网和热网模型组成的热电系统进行案例分析。系统共包含 3 台碳捕集机组、3 台 CHP 机组和 1 个风电场,分别位于 1、2、5、8、9、13、17 节点处,装机容量分别为 300、200、150、200、150、150 和 300 MW<sup>[16]</sup>;参与需求侧响应的电负荷为系统总电负荷的 5%;供暖建筑面积为



15 km<sup>2</sup>,室内温度保持在(20±2)℃<sup>[13, 22-23]</sup>;碳交易价格为 25 元/t;碳捕集设备的捕碳水平为 0.9. 预测电负荷、风电预测值和预测热负荷曲线如图 4 所示. 图中: $P$  为功率.

在 MATLAB 环境下通过 Yalmip 工具箱调用商业求解器 Gurobi 对模型进行求解,系统以 24 h 为调度周期,1 h 为时间间隔进行仿真.

价格型需求响应的时段划分为谷时(1:00—6:00,13:00—15:00)、平时(7:00—9:00,16:00,23:00—24:00)和峰时(10:00—12:00,17:00—22:00),弹性矩阵如表 1 所示.

利用以上电价时段和弹性矩阵对原始负荷预测曲线进行优化,确定峰、平、谷时段下的电价分别为 0.804 1、0.538 2、0.268 0 元/(kW·h),需求响应优化前后负荷曲线对比如图 5 所示. 图中: $P_L$  为负荷功率.

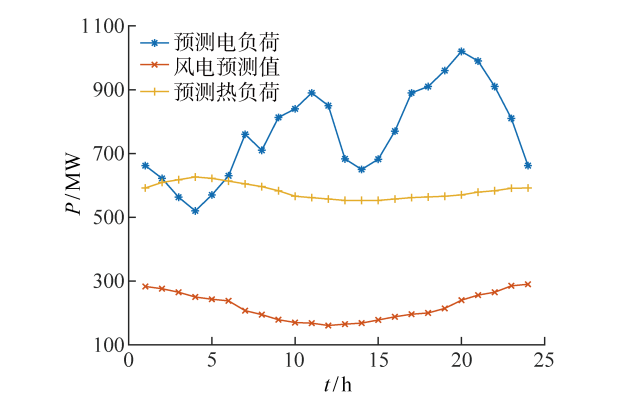


图 4 预测电负荷、风电预测值和预测热负荷曲线  
Fig. 4 Curves of forecast electric load, wind power forecast value, and forecast heat load

表 1 弹性矩阵			
Tab. 1 Elasticity matrix			
时段	谷时	平时	高峰
谷时	−0.100	0.010	0.012
平时	0.010	−0.100	0.016
高峰	0.012	0.016	−0.100

表 2 各案例调度结果分析						
Tab. 2 Analysis of scheduling results of each case						
案例	机组运行成本/元	$F_T$ /元	碳排量/t	$F_Q$ /元	弃风量/(MW·h)	总成本/元
一	414 491	155 403	17 728	366 422	1 221	936 316
二	469 050	−20 320	11 944	215 019	717	663 750
三	396 268	147 534	16 844	120 964	403	664 766
四	452 748	−25 789	11 272	20 183	67	447 142

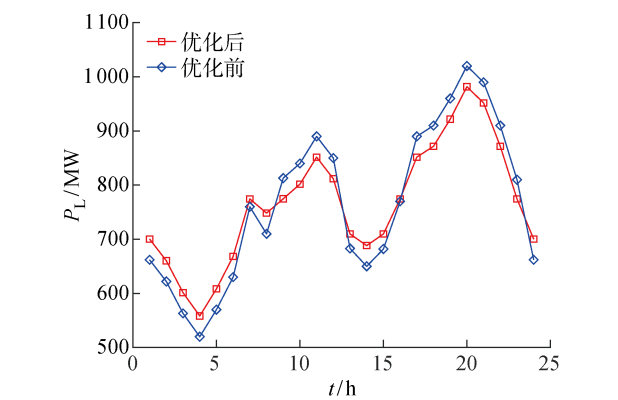


图 5 需求响应优化前后负荷曲线对比图  
Fig. 5 Comparison of load curves before and after demand response optimization

根据是否引入碳捕集设备和考虑电、热负荷灵活性设置 4 个案例,每个案例中都考虑储热装置.

案例一: 不考虑电、热负荷灵活性和碳捕集设备的低碳经济调度.

案例二: 仅考虑引入碳捕集设备的低碳经济调度.

案例三: 仅考虑电、热负荷灵活性的低碳经济调度.

案例四: 考虑电、热负荷灵活性且引入碳捕集设备的低碳经济调度.

4.1 调度结果对比分析

对上述 4 个案例结果进行对比分析,各案例系统成本、弃风量和碳排量如表 2 所示. 由表 2 可知,案例二与案例一相比,碳排量降低 5 784 t,弃风量降低 504 MW·h,总成本减少 272 566 元. 这是由于碳捕集设备的引入使机组的碳排量低于总碳排配额,剩余配额经碳交易市场售卖获利,且机组运行下限的降低使得消纳的风电量也得到提升.

案例三与案例一相比,碳排量降低 884 t,弃风量降低 818 MW·h,机组运行成本减少 38 223 元,总成本减少 27 550 元. 一方面电负荷需求响应将峰时负荷转移到谷时,在有效调用低运行成本机组发电的同时降低谷时的弃风量;另一方面供暖建筑热

负荷惯性可在一定温度范围内调节使 CHP 机组的出力也随之变化,在电负荷低谷时降低热负荷量,使 CHP 机组的电出力降低,提高风电消纳量。

案例四与案例二、三相比,碳排量分别降低 672、5 572 t,弃风量分别降低 650、336 MW·h,总成本分别减少 218 808、217 624 元,证明本文模型可在降低系统碳排量的同时有效减少弃风量。

4.2 风电消纳效果分析

由图 6 可知,案例一在 1:00—6:00 和 24:00 存在大量弃风,原因是该时段处于电负荷低谷期且风电和热负荷功率较大,CHP 机组因高热负荷和“以热定电”特性的约束,虽配置储热设备但仍有较高出力,致使弃风率较高;案例二将传统火电机组改为碳捕集机组使火电机组出力下限更低,与只配置储热设备相比,源侧机组灵活性提高,提升了风电消纳量;案例三综合考虑电负荷需求侧响应和热负荷惯性,在电负荷削峰填谷的同时增加热负荷的灵活性,相比于案例二有更好的风电消纳量,案例四综合考虑源荷两侧的优化,使风电消纳量达到最高。图中: $P_s$  为风电消纳量。

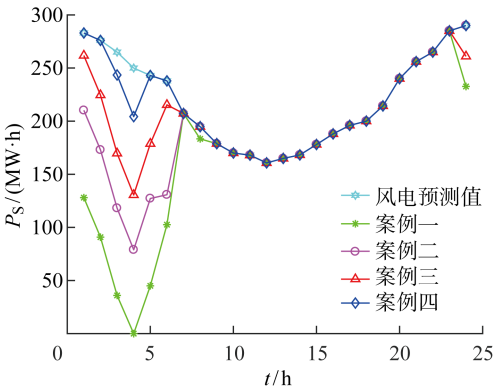


图 6 风电消纳量对比图

Fig. 6 Comparison of wind power consumption

4.3 各机组出力对比分析

由图 7 可知,对于 CHP 机组而言,在夜晚弃风时段案例三、四的净电出力明显低于案例一、二,原因在于热负荷的惯性调节使电负荷谷时的热负荷转移到电负荷峰时,使 CHP 机组电出力下限更低,有利于风电的消纳,图中: $P^{CHP}$  为 CHP 机组净电出力。

由图 8 可知,对于火电机组而言在夜晚弃风时段案例二、四的净电出力明显低于案例一、三,原因是碳捕集装置的能耗使火电机组出力下限更低,下降的功率为风电提供更多上网空间。案例二、四净电出力的不同在于电负荷需求响应使案例四在峰谷时段的出力平稳且更加经济。图中: $P_j$  为火电机组净

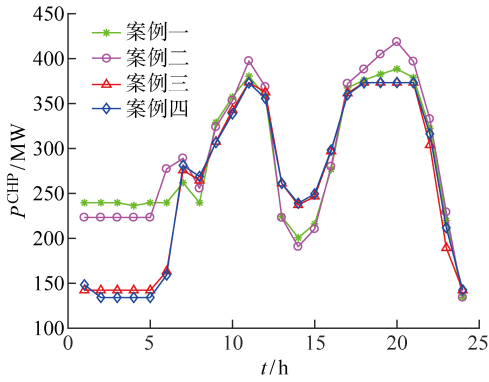


图 7 CHP 机组净电出力图

Fig. 7 Net electric output of CHP units

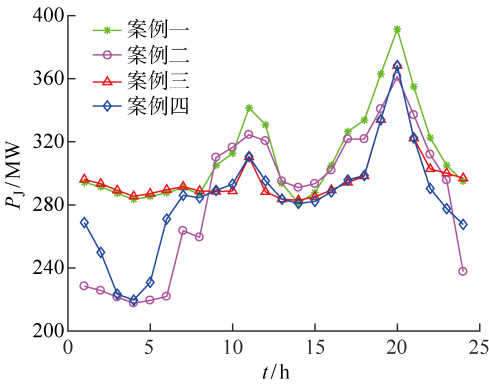


图 8 火电机组净电出力图

Fig. 8 Net electric output of thermal power units

电出力。

4.4 系统碳排放优化分析

各案例总碳排放速率、CHP 机组碳排放速率和火电机组碳排放速率如图 9~11 所示,图中: $E_j$ 、 $E_{hj}$  分别为火电机组和 CHP 机组的净碳排放量。3 种碳排放速率的对比分析如下:

- (1) 1:00—6:00 为高热、低电负荷时段,考虑电负荷需求侧响应和热负荷惯性调节的案例三、四可降低该时段热负荷量,减少 CHP 机组出力,使碳排放速率随之降低;对火电机组而言,配置碳捕集设备的案例二、四碳排放速率明显降低。故案例四系统总碳排放速率最低。
  - (2) 13:00—16:00 阶段由于 1:00—6:00 热负荷的转入使热负荷量增加,案例三、四的 CHP 机组产热量增加致使其碳排放速率升高;对火电机组而言,配置碳捕集设备的案例二、四碳排放速率保持低水平。故相比于案例二而言,案例四系统总碳排放速率略有升高,但低于其他案例。
- 综上所述,本文优化模型在调度周期内均能有效地降低 CHP 机组和火电机组的碳排放速率,增强了系统的低碳性。

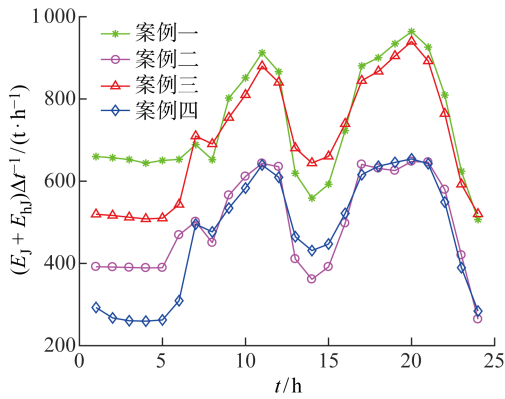


图 9 总碳排放速率

Fig. 9 Total carbon emission rate

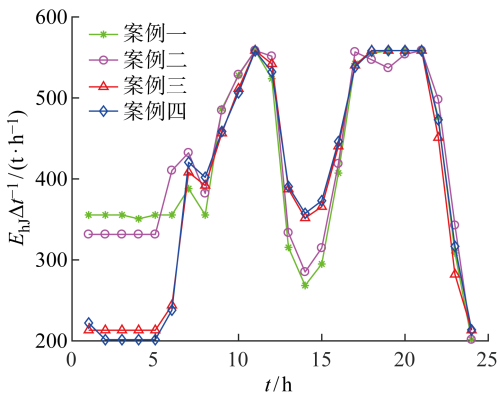


图 10 CHP 机组碳排放速率

Fig. 10 Carbon emission rate of CHP units

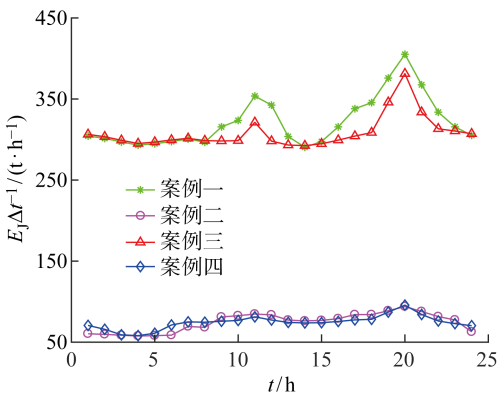


图 11 火电机组碳排放速率

Fig. 11 Carbon emission rate of thermal power units

#### 4.5 碳交易价格影响分析

以案例四为例,如图 12~13 所示,图中  $F_{\text{He}} + F_{\text{Hh}}$  为机组运行成本,碳交易价格的变化对系统碳排放量、碳交易成本、机组运行成本和系统综合运行成本的影响分析如下:

(1) 对系统碳排放量而言,低于 5 元时系统因碳捕集能耗高几乎不启动碳捕集设备,故碳排放量无

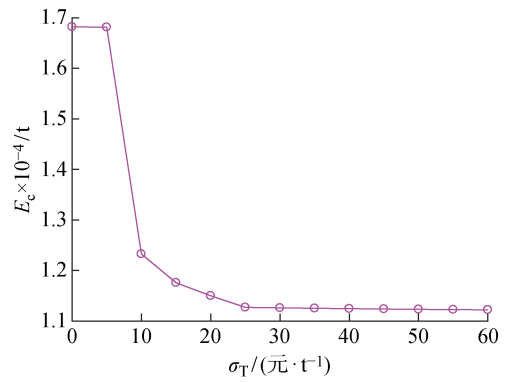


图 12 碳交易价格对系统碳排放影响分析

Fig. 12 Analysis of impact of carbon trading price on carbon emission of the system

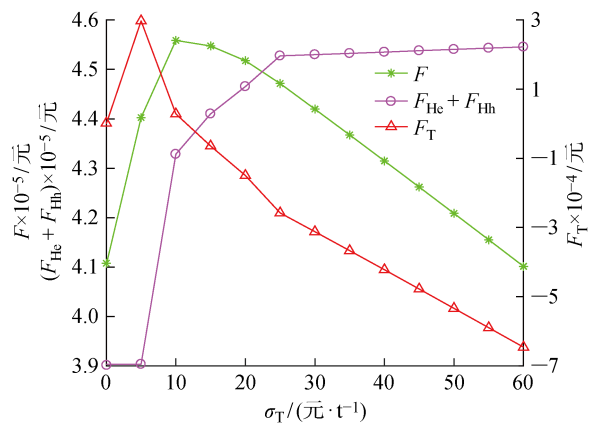


图 13 碳交易价格对系统各成本影响分析

Fig. 13 Analysis of impact of carbon trading price on system costs

明显变化;高于 5 元后系统逐渐启动碳捕集设备,而且碳交易价格的提升致使系统低碳排的机组出力增多,进一步促进系统碳排放量的降低;在达到 25 元后系统碳捕集设备的分流比和低碳排机组出力开始饱和,使碳排放量下降放缓。

(2) 对碳交易成本而言,碳交易价格升高时,碳交易成本随之先升高后降低。原因在于低碳交易价格下系统碳捕集设备只有少量启动,碳排放减少的量远低于碳交易价格增长的量,故碳排放量与价格增长量乘积变大;碳交易价格升高时,系统碳捕集设备逐渐投入运行,且随着低碳排机组出力的增加,系统总碳排水平低于配额值,不断降低系统碳交易成本。

(3) 对机组运行成本而言,碳交易价格升高时,机组运行成本先平缓后升高。原因在于碳交易价格较低时系统机组出力无明显变化;碳交易价格升高时,系统碳捕集设备的投入和高运行成本的低碳排机组出力增多使运行成本升高;碳交易价格超过 25



元时,系统碳捕集设备的投入和高运行成本的低碳排机组出力出现饱和,使运行成本升高放缓。

(4) 对系统综合成本而言,碳交易价格升高时,综合成本先升高后降低。原因在于碳交易价格较低时运行成本和碳交易成本都呈正增长,故综合成本升高;随着碳交易价格升高,碳交易成本下降速率超过机组成本的增长速率,故综合成本开始降低。

综上所述,合理的碳交易价格可促进系统低碳性和经济性的协同发展。

## 5 结论

建立计及需求响应和风电消纳的电-热系统低碳优化调度模型,案例对比分析表明该模型能显著提高系统风电消纳和低碳经济性,具体结论如下:

(1) 相比于仅考虑在源侧加装储热和碳捕集设备的 CHP 系统,在负荷侧进一步考虑电价型需求响应和供暖建筑热负荷惯性,可实现电负荷削峰填谷和热负荷灵活性调节,使系统风电消纳能力、经济性和低碳性显著提高。

(2) 各案例机组净电出力和碳排放速率的对比表明,电价型需求响应和供暖建筑热负荷惯性通过调节电、热负荷,间接降低机组的出力下限,为风电提供更多的上网空间。

(3) 分析碳交易价格对系统碳排放量、碳交易成本、机组运行成本和系统综合运行成本的影响,证明合理的碳交易价格能够促进系统低碳性和经济性的协同发展。

## 参考文献:

[1] ZHANG N, HU Z G, DAI D H, *et al.* Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2016, 7(1): 420-427.

[2] 李政,陈思源,董文娟,等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. **中国电机工程学报**, 2021, 41(12): 3987-4001.

LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, *et al.* Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2021, 41(12): 3987-4001.

[3] 米阳,王鹏,邓锦,等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. **电力系统保护与控制**, 2021, 49(20): 1-8.

MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, *et al.* Hierarchical coordinated control of island AC/DC hybrid microgrids[J]. **Power System Protection & Control**,

2021, 49(20): 1-8.

[4] 王晓海,乔颖,鲁宗相,等. 供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J]. **中国电机工程学报**, 2015, 35(9): 2112-2119.

WANG Xiaohai, QIAO Ying, LU Zongxiang, *et al.* A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2015, 35(9): 2112-2119.

[5] TENG Y, HUI Q, LI Y, *et al.* Availability estimation of wind power forecasting and optimization of day-ahead unit commitment[J]. **Journal of Modern Power Systems & Clean Energy**, 2019, 7(6): 1675-1683.

[6] 王磊,姜涛,宋丹,等. 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. **电力系统保护与控制**, 2021, 49(8): 151-159.

WANG Lei, JIANG Tao, SONG Dan, *et al.* Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio[J]. **Power System Protection & Control**, 2021, 49(8): 151-159.

[7] 李军徽,付英男,李翠萍,等. 提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置[J]. **电网技术**, 2020, 44(12): 4547-4557.

LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, *et al.* Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(12): 4547-4557.

[8] LI J M, WEN J Y, HAN X N. Low-carbon unit commitment with intensive wind power generation and carbon capture power plant[J]. **Journal of Modern Power Systems & Clean Energy**, 2015, 3(1): 63-71.

[9] 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 & Control**, 2021, 49(3): 80-87.

[10] 黄剑平,陈皓勇,林镇佳,等. 需求侧响应背景下分时电价研究与实践综述[J]. **电力系统保护与控制**, 2021, 49(9): 178-187.

HUANG Jianping, CHEN Haoyong, LIN Zhenjia, *et al.* A summary of time-of-use research and practice in a demand response environment[J]. **Power System Protection & Control**, 2021, 49(9): 178-187.

[11] 崔杨,曾鹏,王铮,等. 计及电价型需求侧响应含碳捕集设备的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. **电网技术**, 2021, 45(2): 447-461.

- CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, *et al.* Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(2): 447-461.
- [12] 罗毅, 邱实. 基于负荷侧响应的含储热热电联产的风电消纳模型[J]. **太阳能学报**, 2021, 42(2): 90-96.  
LUO Yi, QIU Shi. A wind power consumption model of chp with thermal energy storage based on demand response [J]. **Acta Energiæ Solaris Sinica**, 2021, 42(2): 90-96.
- [13] 仪忠凯, 李志民. 计及热网储热和供热区域热惯性的热电联合调度策略[J]. **电网技术**, 2018, 42(5): 1378-1384.  
YI Zhongkai, LI Zhimin. Combined heat and power dispatching strategy considering heat storage characteristics of heating network and thermal inertia in heating area[J]. **Power System Technology**, 2018, 42(5): 1378-1384.
- [14] 崔杨, 曾鹏, 王铮, 等. 考虑碳捕集电厂能量转移特性的弃风消纳多时间尺度调度策略[J]. **中国电机工程学报**, 2021, 41(3): 946-961.  
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, *et al.* Multiple time scales scheduling strategy of wind power accommodation considering energy transfer characteristics of carbon capture power plant[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2021, 41(3): 946-961.
- [15] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 等. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度[J]. **电工技术学报**, 2016, 31(17): 41-51.  
LU Zhigang, SUI Yushan, FENG Tao, *et al.* Wind power accommodation low-carbon economic dispatch considering heat accumulator and carbon capture devices[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2016, 31(17): 41-51.
- [16] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. **中国电机工程学报**, 2017, 37(17): 4974-4985.  
YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(17): 4974-4985.
- [17] 陈启鑫, 季震, 康重庆, 等. 碳捕集电厂不同运行方式的电碳特性分析[J]. **电力系统自动化**, 2012, 36(18): 109-115.  
CHEN Qixin, JI Zhen, KANG Chongqing, *et al.* Analysis on relation between power generation and carbon emission of carbon capture power plant in different operation modes[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2012, 36(18): 109-115.
- [18] JI Z, KANG C Q, CHEN Q X, *et al.* Low-carbon power system dispatch incorporating carbon capture power plants[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013, 28(4): 4615-4623.
- [19] 米阳, 李战强, 吴彦伟, 等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. **电网技术**, 2018, 42(6): 1899-1906.  
MI Yang, LI Zhanqiang, WU Yanwei, *et al.* Bi-layer optimal dispatch of grid-connected microgrid based on two-stage demand response[J]. **Power System Technology**, 2018, 42(6): 1899-1906.
- [20] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. **电力系统自动化**, 2005, 29(20): 10-14.  
DING Wei, YUAN Jiahai, HU Zhaoguang. Time-of-use price decision model considering users reaction and satisfaction index [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2005, 29(20): 10-14.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《2019—2020年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)》并做好配额预分配工作的通知[EB/OL]. (2020-12-29)[2020-12-30]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230\\_815546.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html).  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on issuing 2019—2020 National Carbon Emission Trading Quota Setting and Allocation Implementation Plan (power generation industry) and accomplishing the quota pre-allocation work [EB/OL]. (2020-12-29)[2020-12-30]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230\\_815546.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html).
- [22] 李平, 赵适宜, 金世军, 等. 基于热网与建筑物储热解耦的调峰能力提升方案[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(13): 20-28.  
LI Ping, ZHAO Shiyi, JIN Shijun, *et al.* Promotion method of peak regulation capacity by power and heat decoupling based on heat storage of district heating network and buildings [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(13): 20-28.
- [23] DAI Y H, CHEN L, MIN Y, *et al.* Dispatch model for CHP with pipeline and building thermal energy storage considering heat transfer process[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2019, 10(1): 192-203.

(本文编辑:王历历)