

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210037

# 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行

帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 罗志将, 朱海龙, 张益宁

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 针对因传统的热电联产(Combined Heat and Power, CHP)“以热定电”运行方式导致的弃风问题, 提出一种考虑风电消纳和运行经济效益的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行方法。在源侧通过热泵和储能设备解耦 CHP“以热定电”运行约束, 在网侧构建了稳态电-热潮流, 在负荷侧考虑了综合需求响应, 提升系统的风电消纳空间。系统以建设运行总成本最小为目标, 考虑了能量平衡、稳态电-热潮流和 CHP 出力等约束条件, 构建了考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”优化运行模型。最后, 通过风机的 33 节点电网和 8 节点热网构成的综合能源系统验证所提方法的正确性和有效性。多场景仿真结果表明, 该方法可有效提升风电消纳空间和系统经济效益。

**关键词:** 热电联产; 综合能源系统; 综合需求响应; 风电消纳; 经济效益

## “Source-network-load-storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption

SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, LUO Zhijiang, ZHU Hailong, ZHANG Yining

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** There is a wind curtailment problem caused by the traditional Combined Heat and Power (CHP) operation mode of determining-power-by-heat. Thus a method of "source-network-load-storage" coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power accommodation and operational economic benefits is proposed. A heat pump and energy storage equipment are added to the source side to decouple the determining-power-by-heat operation constraints of CHP. Also a steady-state electricity-heat flow is constructed on the network side and integrated demand response is considered on the load side to increase the wind power accommodation space of the system. The system aims to minimize the total cost and takes into account constraint conditions such as the energy balance, steady-state electricity-heat flow and CHP unit output. An integrated energy system "source-network-load-storage" optimized operation model is constructed considering wind power accommodation. Finally, an integrated energy system consisting of a 33-node network containing wind turbines and an 8-node heating network is used to verify the correctness and effectiveness of the proposed method. The results of multi-scenario simulation show that this method can effectively improve the accommodation space of wind power and the economic benefits of the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51867017) and the Graduate Innovation Special Project of Jiangxi Province (No. YC2019-S093).

**Key words:** combined heat and power; integrated energy system; integrated demand response; wind power accommodation; economic benefits

## 0 引言

随着经济的高速发展, 能源的需求在不断扩大, 传统化石能源过度开发利用造成的环境问题变得相当严峻<sup>[1]</sup>。清洁能源因高效、清洁、无污染等特点

备受关注, 但以风电为代表的清洁能源因出力具有波动性和间歇性<sup>[2]</sup>, 给传统电网的稳定运行带来极大挑战<sup>[3]</sup>。综合能源系统<sup>[4]</sup>能够合理利用系统内各种能源, 可以有效提升清洁能源的消纳空间, 提高能源的利用效率, 并减少对环境产生的污染<sup>[5-6]</sup>。但是在综合能源系统中, 在冬季热电联产(Combined Heat and Power, CHP)一般采用“以热定电”运行模式优先保障热能的供应<sup>[7]</sup>。由于风电具有反调峰特

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51867017); 江西省研究生创新专项(YC2019-S093)

性, 在夜间发电较高, 并且电、热负荷供需存在矛盾, CHP “以热定电”运行导致弃风, 造成能源资源浪费。

优化能源结构、高效合理利用能源、综合能源系统优化可提升清洁能源的消纳。文献[8]将电转气技术和 CHP 结合, 同时考虑了清洁能源的消纳和环境污染物的排放, 提出一种联合经济调度模型, 以此提升风电消纳率和系统经济性。文献[9]引入包含电、热、气的综合需求响应, 构建了电热气的区域能源系统优化模型, 减少了用能峰谷差, 提高能源利用效率, 提升系统经济效益。文献[10]考虑了综合能源系统的能量耦合和相关扰动变量, 提出基于消息总线的多能流潮流协同构建, 可有效评价系统运行情况, 提升系统的运行可靠性。文献[11]考虑了热网实际运行情况, 提出一种考虑热传递约束的综合能源系统经济调度模型, 在此基础上结合热储能来提升风电的消纳。文献[12]在综合能源系统中配置了电锅炉设备, 并考虑了热网延时和衰减, 建立了综合能源优化调度模型, 能够有效提升系统的经济效益。文献[13]引入了负荷综合需求响应模型, 构建了主从博弈优化调度模型, 以此提升能源系统和用户的综合效益。上述文献通过合理优化能源系统, 以此提升系统对风电的消纳率, 目前对于综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行的研究较少, 值得深入探讨。

本文提出一种考虑风电消纳的综合能源“源-网-荷-储”协调优化调度方法。在系统的源侧采用风电和热泵相结合, 并引入储能设备, 提升风电的消纳空间; 在电网侧通过无功补偿来保障电能质量, 通过电网和热网耦合, 构建了综合能源系统稳态潮流; 在负荷侧引入了综合需求响应, 考虑了电、热 2 种负荷的需求响应, 结合电热能源之间的耦合特性, 充分发挥综合需求响应在综合能源系统的经济调度作用, 进一步提升风电消纳。本文考虑了建设成本和污染物的处理费用, 以系统经济运行为目标, 构建了综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行模型, 采用 CPLEX 进行求解, 得到各个时间节点机组的出力、系统运行成本, 以此验证所提方法的优越性。

## 1 综合能源系统结构

综合能源系统的能量流向如图 1 所示。系统由风机、热泵、CHP、电储能设备、热储能设备、电力网络、热力网络、电负荷以及热负荷构成。系统的电负荷由风机、CHP、电储能设备及上级电网供给; 热负荷由热泵、CHP 和热储能设备供给; 电、

热负荷综合需求响应灵活参与调度。

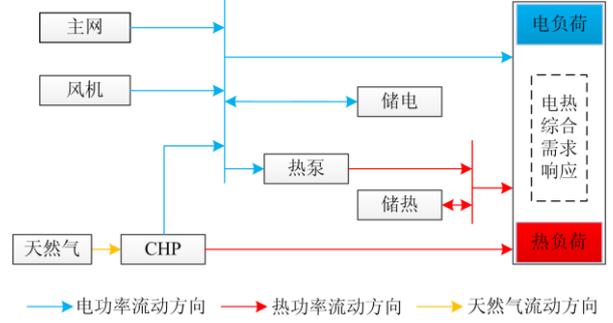


图 1 综合能源系统结构图

Fig. 1 Structure of integrated energy system

## 2 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同运行模型

### 2.1 目标函数

综合能源日优化运行模型以调度周期内系统经济运行总成本最小为目标, 包括了系统的建设成本、系统向上级电网购电费用、CHP 的购气费用、设备的运维费用、污染物处理费用, 同时考虑可再生能源消纳和需求响应中的补偿成本, 将弃风以惩罚项的形式加至目标函数中。本文的 CHP 采用燃烧天然气来产生能量。总目标函数如式(1)所示。

$$\min \sum_{t=1}^{Nt} (C_{JS,t} + C_{E,t} + C_{YW,t} + C_{G,t} + C_{WT,t}^{\text{loss}} + C_{EN,t} + C_{E,t}^{\text{IDR}}) \quad (1)$$

式中:  $Nt$  为调度时段数;  $C_{JS,t}$  为系统建设成本折算值;  $C_{E,t}$  为  $t$  时段系统向上级电网的购电费用;  $C_{YW,t}$  为  $t$  时段设备的运维成本;  $C_{G,t}$  为  $t$  时段 CHP 的购气费用;  $C_{WT,t}^{\text{loss}}$  为  $t$  时段系统的弃风惩罚费用;  $C_{EN,t}$  为  $t$  时段的环境成本;  $C_{E,t}^{\text{IDR}}$  为  $t$  时段需求响应的补偿成本。

$$C_{JS,t} = \sum_{n=1}^{NS} \frac{C_{C,n} \cdot C_{\lambda,n} - V_n}{T_n} \quad (2)$$

$$C_{E,t} = c_t^{\text{E, in}} P_t^{\text{in}} \Delta t \quad (3)$$

$$C_{YW,t} = D_{\text{CHP}} P_{\text{CHP},t} \Delta t + D_{\text{WT}} P_{\text{WT},t} \Delta t + D_{\text{HP}} P_{\text{HP},t} \Delta t + D_{\text{ES}} |P_{\text{ES},t}| \Delta t + D_{\text{HS}} |H_{\text{HS},t}| \Delta t \quad (4)$$

$$C_{G,t} = c_t^{\text{G, in}} G_t^{\text{in}} \Delta t \quad (5)$$

$$C_{WT,t}^{\text{loss}} = \phi_{\text{WT},t} P_{\text{WT},t}^{\text{loss}} \Delta t \quad (6)$$

$$C_{EN,t} = \sum_{r=1}^L (\alpha_r (E_r (P_{\text{CHP},t} \Delta t) + E_r (P_t^{\text{in}} \Delta t))) \quad (7)$$

$$C_{E,t}^{\text{IDR}} = \phi_t^{\text{IDR}} H_{\text{DR},t}^{\text{inte}} \Delta t \quad (8)$$

式中：\$NS\$ 为系统的设备数量；\$C\_{C,n}\$、\$C\_{\lambda,n}\$、\$V\_n\$、\$T\_n\$ 分别为第 \$n\$ 台设备的单位投资成本、容量、使用寿命、残值；\$P\_t^{\text{in}}\$ 为 \$t\$ 时段系统的购电功率；\$G\_t^{\text{in}}\$ 为 \$t\$ 时段系统的购气功率；\$P\_{\text{CHP},t}\$、\$P\_{\text{WT},t}\$、\$P\_{\text{HP},t}\$、\$P\_{\text{ES},t}\$ 分别为 \$t\$ 时段的 CHP、风机、热泵、电储装置的电功率；\$H\_{\text{HS},t}\$ 为 \$t\$ 时段热储的热功率；\$D\_{\text{CHP}}\$、\$D\_{\text{WT}}\$、\$D\_{\text{HP}}\$、\$D\_{\text{ES}}\$、\$D\_{\text{HS}}\$ 为对应设备的单位维护成本；\$P\_{\text{WT},t}^{\text{loss}}\$ 为 \$t\$ 时段风机的弃风功率；\$H\_{\text{DR},t}^{\text{inte}}\$ 为 \$t\$ 时段的综合需求响应中断热负荷；\$\Delta t\$ 为调度时间间隔；\$c\_t^{\text{E,in}}\$、\$c\_t^{\text{G,in}}\$ 分别为 \$t\$ 时段购电、购气的单位价格；\$\phi\_{\text{WT},t}\$ 为单位弃风的惩罚成本系数；\$\varphi\_t^{\text{IDR}}\$ 为 \$t\$ 时段的单位需求响应中断热负荷的补偿价格；\$E\_r(P\_{\text{CHP},t}\Delta t)\$、\$E\_r(P\_t^{\text{in}}\Delta t)\$ 分别为 CHP 及系统的购电功率的第 \$r\$ 种污染物排放量；\$\alpha\_r\$ 为第 \$r\$ 种污染物的相应治理费用；\$L\$ 为排放的污染物种类。

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 电力系统约束

本文采用辐射状网络构建电力系统网络模型，如图 2 所示，采用线性化 DistFlow 潮流模型进行建模<sup>[14]</sup>。

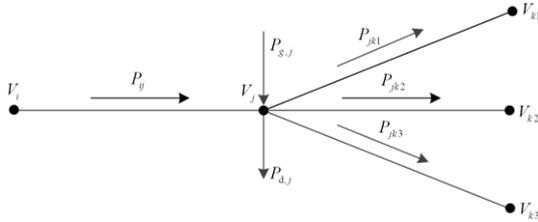


图 2 辐射状配电网结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radial distribution network structure

$$P_{ij,t} + P_{\text{WT},j,t} + P_{g,j,t} = \sum_{k \in \pi(j)} P_{jk,t} + P_{d,j,t} \quad (9)$$

$$Q_{ij,t} + Q_{g,j,t} + Q_{cj,t} = \sum_{k \in \pi(j)} Q_{jk,t} + Q_{d,j,t} \quad (10)$$

$$Q_{ij,t} + Q_{g,j,t} = \sum_{k \in \pi(j)} Q_{jk,t} + Q_{d,j,t} \quad (11)$$

$$U_{j,t} = U_{i,t} - \frac{r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}}{U_0} \quad (12)$$

$$U_i^l \leq U_{i,t} \leq U_i^u, U_0 = V_{sl}^2 \quad (13)$$

$$P_{\text{WT}}^l \leq P_{\text{WT},j,t} \leq P_{\text{WT}}^u \quad (14)$$

式中：\$P\_{ij,t}\$ 与 \$Q\_{ij,t}\$ 分别为 \$t\$ 时段线路的传输有功功率与无功功率；\$P\_{d,j,t}\$ 与 \$Q\_{d,j,t}\$ 分别为 \$t\$ 时段节点 \$j\$ 的有功、无功功率需求；\$P\_{g,j,t}\$ 与 \$Q\_{g,j,t}\$ 分别为 \$t\$ 时段各发

电机发出的有功与无功；\$P\_{\text{WT},j,t}\$ 是风机在 \$t\$ 时段的功率。

### 2.2.2 热力系统约束

区域热力系统通常由热源、热负荷、供水网络和回水网络组成，如图 3 所示。本文采用由热力分布和水力分布构成的工质流模型描述热网潮流信息，其相应的热力分布可建模为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \sum_{b \in T(i)} (\tau_{b,t}^{\text{S,out}} \dot{m}_{b,t}^{\text{S}}) = \tau_{i,t}^{\text{S}} \sum_{b \in T(i)} \dot{m}_{b,t}^{\text{S}}, \forall i, t \\ \sum_{b \in F(i)} (\tau_{b,t}^{\text{R,out}} \dot{m}_{b,t}^{\text{R}}) = \tau_{i,t}^{\text{R}} \sum_{b \in F(i)} \dot{m}_{b,t}^{\text{R}}, \forall i, t \\ \tau_{b,t}^{\text{S,in}} = \tau_{i,t}^{\text{S}}, \tau_{b,t}^{\text{R,in}} = \tau_{i,t}^{\text{R}}, \forall i, b, t \\ \tau_{b,t}^{\text{S,out}} = (\tau_{b,t}^{\text{S,in}} - \tau_t^{\text{am}}) e^{-\frac{\lambda_b l_b}{c_p \dot{m}_{b,t}^{\text{S}}}} + \tau_t^{\text{am}}, \forall b, t \\ \tau_{b,t}^{\text{R,out}} = (\tau_{b,t}^{\text{R,in}} - \tau_t^{\text{am}}) e^{-\frac{\lambda_b l_b}{c_p \dot{m}_{b,t}^{\text{R}}}} + \tau_t^{\text{am}}, \forall b, t \end{cases} \quad (15)$$

式中：\$c\_p\$ 为水的比热容；\$\tau\_{b,t}^{\text{S,out}}\$、\$\tau\_{b,t}^{\text{S,in}}\$、\$\tau\_{b,t}^{\text{R,out}}\$ 和 \$\tau\_{b,t}^{\text{R,in}}\$ 分别为供水管网和回水管网的出口及入口温度；\$\dot{m}\_{b,t}^{\text{S}}\$ 和 \$\dot{m}\_{b,t}^{\text{R}}\$ 分别为流经供水管网和回水管网的流体质量流率；\$\tau\_t^{\text{am}}\$ 为 \$t\$ 时段的环境温度；\$\lambda\_b\$ 为管道 \$b\$ 的温度损耗系数；\$l\_b\$ 为管道 \$b\$ 的长度。

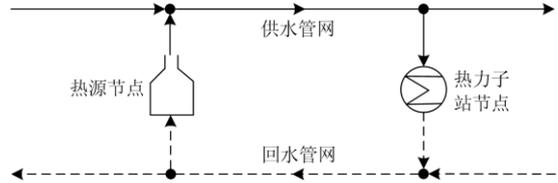


图 3 供热网络结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure for heating network

热力网络的水力分布可通过质量守恒约束表示：

$$\begin{cases} \sum \dot{m}_{b,t}^{\text{S}} + \dot{m}_{d,i,t} = \dot{m}_{g,i,t} + \sum_{b \in T(i)} \dot{m}_{b,t}^{\text{S}}, \forall i, t \\ \sum_{b \in F(i)} \dot{m}_{b,t}^{\text{R}} + \dot{m}_{g,i,t} = \dot{m}_{d,i,t} + \sum_{b \in T(i)} \dot{m}_{b,t}^{\text{R}}, \forall i, t \\ 0 \leq \dot{m}_{b,t}^{\text{S}} \leq \dot{m}_b^u, 0 \leq \dot{m}_{b,t}^{\text{R}} \leq \dot{m}_b^u, \forall b, t \end{cases} \quad (16)$$

式中：\$\dot{m}\_{g,i,t}\$、\$\dot{m}\_{d,i,t}\$ 分别为 \$t\$ 时段节点 \$i\$ 热源与热负荷的质量流率；\$\dot{m}\_b^u\$ 为管道 \$b\$ 能承载的质量流率的最大值。

热力系统中热源与热负荷的热功率满足：

$$\begin{cases} h_{\text{hp},j,t} = c_p \dot{m}_{g,j,t} (\tau_{j,t}^{\text{S}} - \tau_{j,t}^{\text{R}}), \forall j, t \\ h_{g,i,t} = c_p \dot{m}_{g,i,t} (\tau_{i,t}^{\text{S}} - \tau_{i,t}^{\text{R}}), \forall i, t \\ h_{d,i,t} = c_p \dot{m}_{d,i,t} (\tau_{i,t}^{\text{S}} - \tau_{i,t}^{\text{R}}), \forall i, t \end{cases} \quad (17)$$

式中，\$h\_{\text{hp},j,t}\$、\$h\_{g,i,t}\$、\$h\_{d,i,t}\$ 分别为 \$t\$ 时段热泵、CHP、热负荷需求的热功率。

本文的热力网络采用 CF-VT 调节方式, 采用固定的质量流率, 调节供、回水温度来保障热力负荷的供应, 热力网络模型因此可转换为线性模型。

### 2.2.3 能量转换约束

#### 1) CHP 约束

CHP 燃烧天然气产生高品位热能驱动微燃机发电, 所产生的高温余热可经吸收后用于供暖<sup>[16]</sup>, 实现了能源的高效利用, 其数学模型可表示为<sup>[17-18]</sup>

$$H_{\text{CHP},t} = C_h P_{\text{CHP},t} (1 - \eta_{\text{MT},t} - \eta_L) / \eta_{\text{MT},t} \quad (18)$$

$$G_{\text{CHP},t} = P_{\text{CHP},t} / (\eta_{\text{MT},t} L_{\text{gas}}) \quad (19)$$

$$P_{\text{CHP},t}^{\min} \leq P_{\text{CHP},t} \leq P_{\text{CHP},t}^{\max} \quad (20)$$

$$H_{\text{CHP},t}^{\min} \leq H_{\text{CHP},t} \leq H_{\text{CHP},t}^{\max} \quad (21)$$

式中:  $\eta_{\text{MT},t}$ 、 $\eta_L$ 、 $C_h$  分别为 CHP 在  $t$  时段的发电效率、散热损失率、制热系数;  $G_{\text{CHP},t}$  为 CHP 在  $t$  时段的用气功率;  $L_{\text{gas}}$  为天然气低热值。

#### 2) 热泵设备约束

热泵供热量与电量间的关系为<sup>[19]</sup>

$$H_{\text{HP},t} = \eta_{\text{HP}} P_{\text{HP},t} \quad (22)$$

$$H_{\text{HP},t}^{\min} \leq H_{\text{HP},t} \leq H_{\text{HP},t}^{\max} \quad (23)$$

式中:  $H_{\text{HP},t}$ 、 $P_{\text{HP},t}$  分别为热泵在  $t$  时段的产热量和电能消耗量;  $\eta_{\text{HP}}$  为热泵的电热转换效率;  $H_{\text{HP},t}^{\max}$ 、 $H_{\text{HP},t}^{\min}$  分别为热泵出热的上下限。

#### 3) 电储能约束

电储能设备可以有效提高系统的备用能力和调节能力<sup>[20]</sup>。本文采用的储能设备为蓄电池, 其能量数学模型可表示为<sup>[21]</sup>

$$E_t = E_{t-1} + P_{\text{ch},t} \eta_{\text{ch}} - P_{\text{dis},t} / \eta_{\text{dis}} \quad (24)$$

#### (1) 容量约束

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (25)$$

#### (2) 充放电功率约束

$$0 \leq P_{\text{dis},t} \leq P_{\text{dis}}^{\max} U_{\text{dis},t} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{\text{ch},t} \leq P_{\text{ch}}^{\max} U_{\text{ch},t} \quad (27)$$

#### (3) 调度周期始末储能能量平衡约束

$$E_{\text{NT}} = E_0 \quad (28)$$

#### (4) 充放电状态转换约束

$$U_{\text{ch},t} + U_{\text{dis},t} = 1 \quad (29)$$

$$Y_{\text{dis},t} - Z_{\text{ch},t} = U_{\text{dis},t+1} - U_{\text{dis},t} \quad (30)$$

$$Y_{\text{dis},t} + Z_{\text{ch},t} \leq 1 \quad (31)$$

$$\sum_t (Z_{\text{ch},t} + Y_{\text{dis},t}) \leq N \quad (32)$$

式中:  $E_t$  为蓄电池在  $t$  时段存储电能的总量;  $\eta_{\text{ch}}$ 、

$\eta_{\text{dis}}$  分别为蓄电池的充、放电效率;  $U_{\text{ch},t}$ 、 $U_{\text{dis},t}$  分别为蓄电池在  $t$  时段的充、放电状态变量;  $Z_{\text{ch},t}$ 、 $Y_{\text{dis},t}$  分别为蓄电池在  $t$  时段的充、放电转换状态变量;  $N$  为蓄电池充放电转换次数限值。

#### 4) 热储能约束

本文的热储能设备采用蓄热罐, 其能量数学模型可表示为

$$S_{r,t} = S_{r,t-1} + h_{c,t} \eta_{\text{Hc}} - \frac{h_{d,t}}{\eta_{\text{Hd}}} \quad (33)$$

$$S_r^{\min} \leq S_{r,t} \leq S_r^{\max} \quad (34)$$

$$S_{r,0} = S_{r,\text{NT}} \quad (35)$$

式中:  $S_{r,t}$  为蓄热罐在时段  $t$  的储热量;  $\eta_{\text{Hc}}$ 、 $\eta_{\text{Hd}}$  分别为蓄热罐的储热、放热效率;  $S_r^{\max}$ 、 $S_r^{\min}$  为蓄热罐容量的上下限。

### 2.2.4 综合需求响应约束

#### 1) 基于负荷转移率模型的电需求响应约束

负荷转移率是在实施峰谷分时电价后, 用户负荷从电价高的时段向电价低的时段转移的用电量与电价高的时段所对应负荷的比值<sup>[22]</sup>。基于负荷转移率的用户响应模型可以近似拟合成分段线性函数, 峰谷时段的负荷转移率可表示为

$$\lambda_{\text{pv}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \Delta p_{\text{pv}} \leq a_{\text{pv}} \\ K_{\text{pv}} (\Delta p_{\text{pv}} - a_{\text{pv}}) & a_{\text{pv}} < \Delta p_{\text{pv}} < b_{\text{pv}} \\ \lambda_{\text{pv}}^{\max} & \Delta p_{\text{pv}} \geq b_{\text{pv}} \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $\Delta p_{\text{pv}}$  为峰、谷时段的电价差;  $a_{\text{pv}}$  为峰谷时段死区的上限值;  $b_{\text{pv}}$  为峰谷时段线性区的上限值;  $K_{\text{pv}}$  为峰谷时段线性区的斜率;  $\lambda_{\text{pv}}^{\max}$  为峰谷时段负荷转移率的上限值。

同理, 可以构建峰平、平谷时段的负荷转移率曲线。由上述响应度曲线, 各时段的拟合负荷可表示为

$$L_t = \begin{cases} L_{t0} + \lambda_{\text{pv}} \overline{L_p} + \lambda_{\text{tv}} \overline{L_f}, & t \in T_v \\ L_{t0} + \lambda_{\text{pf}} \overline{L_p} - \lambda_{\text{tv}} \overline{L_f}, & t \in T_f \\ L_{t0} - \lambda_{\text{pv}} \overline{L_p} - \lambda_{\text{pf}} \overline{L_p}, & t \in T_p \end{cases} \quad (37)$$

式中:  $T_v$ 、 $T_f$ 、 $T_p$  分别为峰时段、平时段、谷时段;  $t$  为调度周期内的任一时段;  $L_{t0}$ 、 $L_t$  分别为  $t$  时段实施分时电价前的负荷、实施分时电价后的负荷;  $\overline{L_p}$ 、 $\overline{L_f}$  分别为峰时段、平时段总负荷在相应时段内的平均值。

#### 2) 热负荷需求响应约束

在冬季用户的用热负荷主要是供暖负荷, 本文采用可转移负荷和可中断负荷对其进行需求响应,

可表示为<sup>[23]</sup>

$$\bar{H}_{LD,t} = H_t^{LDR} + H_{DR,t} \quad (38)$$

$$H_{DR}^{inte} = \sum_{i=1}^{N_i} H_{DR,i} \quad (39)$$

$$\bar{H}_{LD,t} - H_{LD,t}^{max} \leq \alpha_{HLD,t} \bar{H}_{LD,t} \quad (40)$$

$$0 \leq H_{DR}^{inte} \leq H_{DR}^{max} \quad (41)$$

式中： $\bar{H}_{LD,t}$ 、 $H_{DR,t}$ 、 $H_t^{LDR}$  分别为  $t$  时段热负荷的预测值、需求侧响应的热负荷值、需求响应后的热负荷值； $H_{LD,t}^{max}$ 、 $\alpha_{HLD,t}$  分别为  $t$  时段系统热负荷的上限值、需求侧可响应热负荷比例； $H_{DR}^{inte}$  为整个调度周期内热负荷中断负荷的总量； $H_{DR}^{max}$  为调度周期内可中断热负荷的上限。

当  $H_{DR,t}$  大于 0 时，表示此时段系统的热负荷转出；当  $H_{DR,t}$  小于 0 时，表示此时段热负荷的转入。当  $H_{DR}^{inte}$  为 0 时，系统的需求响应热负荷中无可中断负荷，全部为可转移热负荷。

### 2.3 模型求解

本文所建立的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行模型是混合整数线性规划问题，在 Matlab 下用 Yalmip 建立模型，采用商业求解器 CPLEX 进行求解。

## 3 算例分析

### 3.1 基础数据与参数

本文构建的综合能源系统由 33 节点电网、8 节点热网、1 台风机、1 台 CHP、1 台热泵、1 台蓄电池、1 台蓄热罐构成，如图 4 所示。系统中 CHP 的参数可参考文献[18]，各设备的建设成本折算参数可参考文献[24]。系统中风机的预测出力、总电负荷需求和总热负荷需求如图 5 所示，电网中各节点负荷分配比例从 Matpower 33 节点数据中求得，热网各节点热负荷分配比例可参考文献[25]。为了保证电网的电压质量，在母线 3 处设置了无功补偿设备。弃风惩罚成本设为 0.1 元/kWh。考虑综合需求响应时，其最大可中断热负荷为总预测热负荷的 5%，其补偿成本为 0.1 元/kWh，系统向上级电网购电的电价采用分时电价，其电价信息如表 1 所示。

表 1 综合能源系统与主网间电价信息

Table 1 Electricity price information between integrated energy system and main network

参数	01:00—6:00	07:00—09:00	10:00—12:00
	23:00—24:00	13:00—17:00	18:00—22:00
购电电价/ (元/kWh)	0.42	0.88	1.35

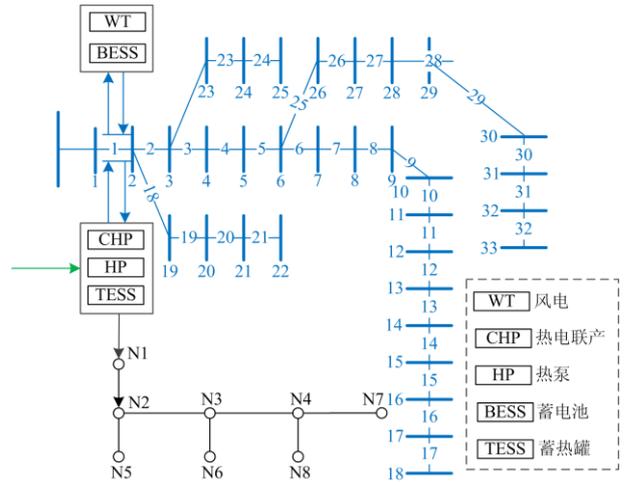


图 4 综合能源系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of integrated energy system structure

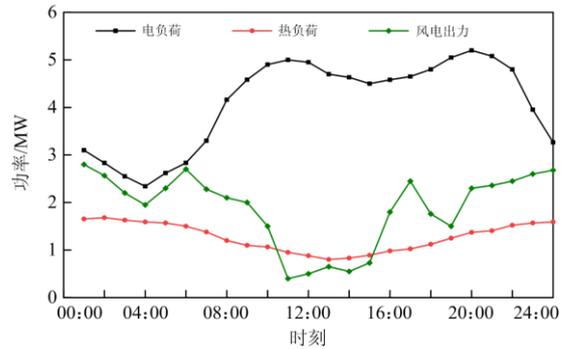


图 5 冬季典型日风、负荷预测出力

Fig. 5 Typical daily wind power and load forecast output in winter

为验证本文所提的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行方法，对提升风电消纳能力、降低系统运行成本的有效性，提出 4 个场景，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，不考虑电热综合需求响应。

场景 2：有热泵，无储能，不考虑电热综合需求响应。

场景 3：有热泵，有储能，不考虑电热综合需求响应。

场景 4：有热泵，有储能，考虑电热综合需求响应。

### 3.2 系统优化运行结果

#### 1) 场景 1 仿真结果(图 6)

运行周期内，综合能源系统的电负荷供应需求由 CHP、风电和向上级电网购电满足，热负荷的供

应需求由 CHP 满足。由于 CHP 采用“以热定电”运行模式优先保障热力负荷需求, 无法灵活调节其电力出力, 导致在 01:00—06:00 和 24:00 弃风严重, 系统的经济运行成本极大。

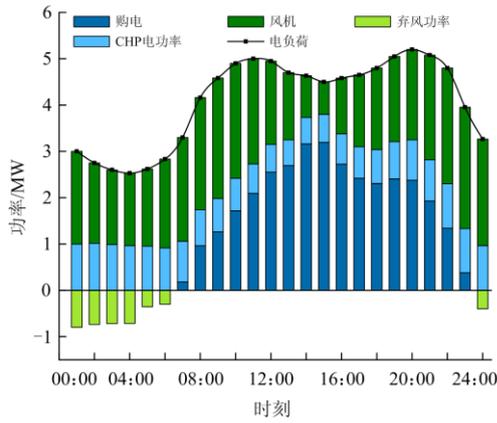


图 6 场景 1 运行结果

Fig. 6 Operating results in scenario 1

### 2) 场景 2 仿真结果(图 7)

热泵接入系统后, 解耦了 CHP 的“以热定电”运行方式, 在 01:00—06:00 和 23:00—24:00 时段风电充沛, 此时系统的电价是谷电价, 热泵制热相对成本较低, 直接调用热泵机组优先供热。此期间 CHP 热力出力相比场景 1 小, 风机的消纳空间得到提升。在电价平时段和峰时段, CHP 的电出力成本低于系统的购电成本, 系统的热力负荷优先由 CHP 供应, 热泵机组不出力。

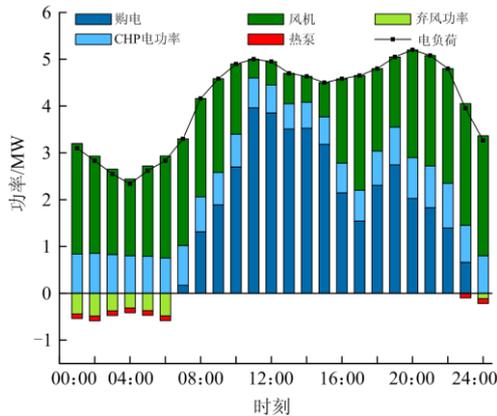


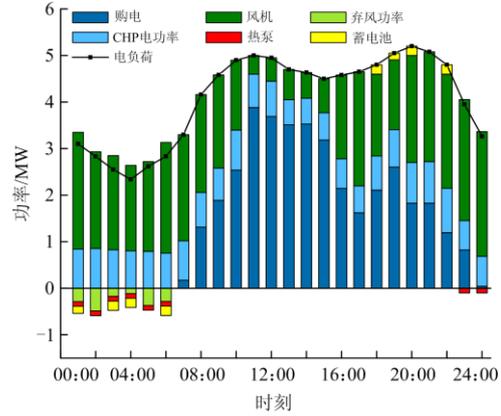
图 7 场景 2 运行结果

Fig. 7 Operating results in scenario 2

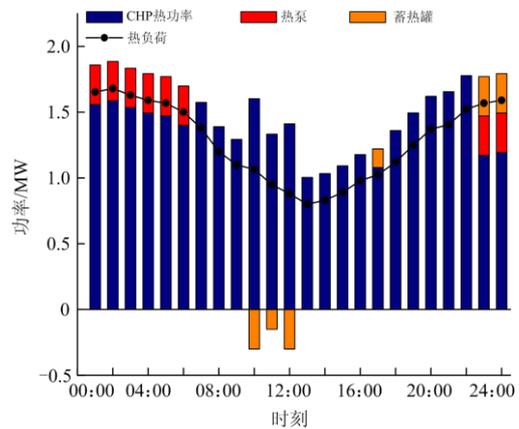
### 3) 场景 3 仿真结果(图 8)

引入储能设备后, 系统的能量调节能力更加灵活。电储能设备在电价谷时段进行充电, 吸收部分风电, 在电价峰时段进行放电, 提升系统的经济性。热储能设备在电价的峰时段 10:00—12:00 进行充

热, 此时的热力负荷较小, 电力负荷较大, 制热成本相对较低。在 17:00 和 23:00—24:00 时段进行放热, 此时电价相对峰时段较低, 减少了 CHP 的热出力和电出力, 提升了系统的风电消纳空间。



(a) 电力平衡



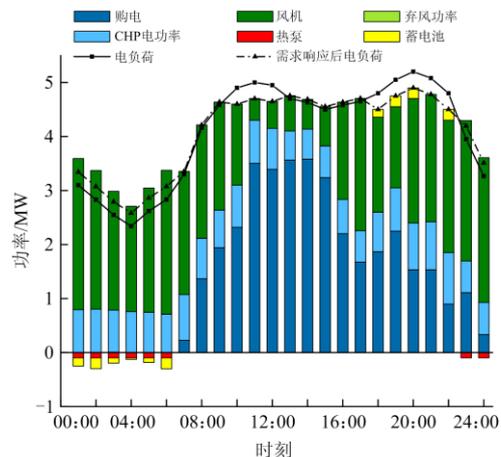
(b) 热力平衡

图 8 场景 3 运行结果

Fig. 8 Operating results in scenario 3

### 4) 场景 4 仿真结果(图 9)

引入综合需求响应后, 用户的电力负荷需求在



(a) 电力平衡

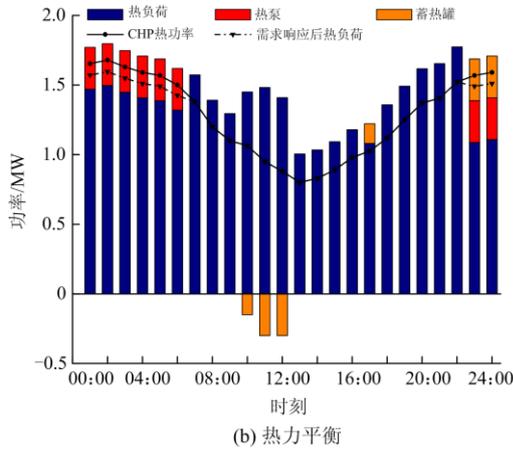


图 9 场景 4 运行结果

Fig. 9 Operating results in scenario 4

分时电价的引导下进行相应转移，将电价高的部分负荷转移到电价较低的时段，对原负荷曲线产生了削峰填谷的作用，有效提升了风电在负荷低谷时期的消纳空间。用户的热力负荷在 01:00—06:00 和 23:00—24:00 时段进行了削减，减少了热力需求，减少了此时段的 CHP 热力出力，进一步提升了风电在此时段的消纳空间，提升了系统的经济性。

01:00—06:00 时段，电价谷时段，热泵机组热出力成本比 CHP 低，优先出力保障热力负荷需求，减少 CHP 出力。在此期间，电储能设备进行充电，吸收部分风电。系统的电负荷需求由风电和 CHP 供应。07:00—09:00 时段，电价平时期，电力负荷逐渐攀升，风机出力降低，系统的电负荷需求由风电、CHP 和向上级电网购电供应。热力负荷开始降低，电制热成本此时高于 CHP 热出力成本，热泵关机，热负荷需求由 CHP 供应。10:00—12:00 时段，电价峰时段，此时 CHP 电出力成本比系统购电成本低，CHP 加大出力，多出的热能由热储能设备吸收。13:00—17:00 时段，电价平时段，CHP 减少出力，系统加大购电保障电力负荷需求。18:00—22:00 时段，电价峰时段，电力负荷较大，电储能设备放出电能，减少系统购电。23:00—24:00 时段，电价低谷，电负荷减低，热负荷较大，由热泵开机供热，热储能设备放出热能，减少 CHP 出力，提升风电的吸收空间。

热力网络在热负荷高峰 02:00 和非峰值 13:00 的温度分布如图 10 所示。通过调节回水的温度可以满足不同时期的热功率需求。在供水温度调节时，供回水温度差越大，系统的供热量越大。

### 3.3 风电消纳率对比

通过分析对比以上场景可知，在 01:00—06:00、

24:00 受风电出力的反调峰特性与 CHP 的“以热定电”运行模式影响，场景 1 此时段内弃风情况严重，在调度周期的 01:00—06:00 时段，综合能源系统风电消纳率均低于 0.8，而此时段内场景 2、场景 3 风电消纳率均得到了明显提高，验证了热泵设备与储能设备对风电消纳的促进作用，可提升风电消纳。场景 4 的风电得到了全部消纳，有效解决了综合能源系统的弃风问题。通过算例对比可知，本文所提方法能够有效提升风电消纳空间，减少弃风问题。各场景风电消纳率如图 11 所示。

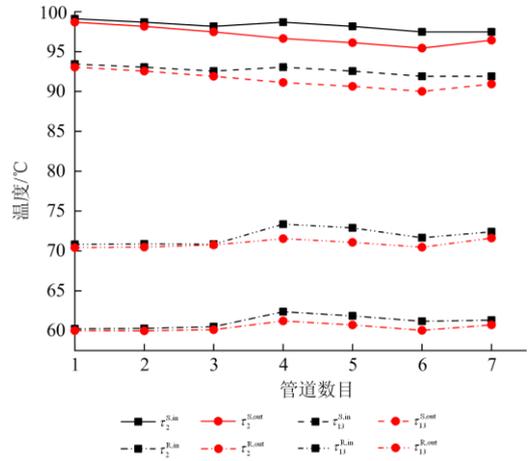


图 10 高峰和非高峰时段的管道温度

Fig. 10 Pipe temperature at on-peak and off-peak time

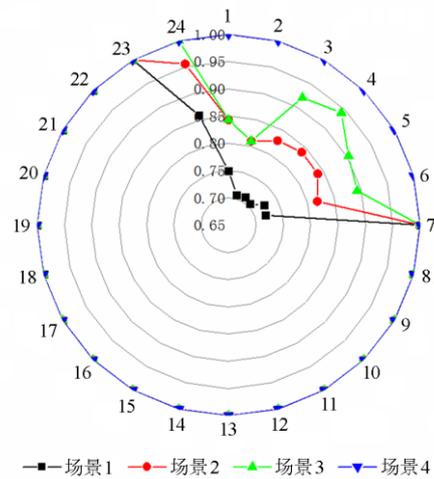


图 11 各场景风电消纳率

Fig. 11 Wind power accommodation rates under various scenarios

### 3.4 运行成本对比

各场景综合能源系统的建设运行成本如表 2 所示。场景 4 的弃风惩罚成本、环境成本较场景 1 分别下降了 100%、6.7%，总成本降低了 7.5%。通过算例对比可知，本文所提方法能够有效减少弃风，

表 2 各场景的总成本构成

Table 2 Total cost composition for each scenario

成本/(元/天)	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
建设成本				
折旧值	4 624.11	4 650.68	4 969.58	4 969.58
购电成本	43 468.33	43 578.17	42 184.24	39 610.04
燃料成本	14 281.68	13 321.68	13 324.70	13 046.50
运维成本	4 090.55	3 968.76	4 147.55	4 140.87
弃风惩罚成本	442.43	259.35	172.54	0
环境成本	1 289.55	1 253.46	1 238.23	1 202.43
综合需求	—	—	—	63.91
响应成本				
总成本	68 196.65	67 032.10	66 036.84	63 033.33

减少污染物排放, 提高综合能源系统的经济性。

## 4 结论

本文提出一种考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行方法。在包含 CHP、风机、热泵、储电、储热设备的综合能源系统的基础上, 通过电网和热网的耦合, 构建了综合能源系统稳态潮流, 考虑了污染物的处理费用, 以系统经济运行为目标构建了综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行模型。通过分析对比不同场景下不同方式的仿真运行结果, 验证了本文所提方法的有效性和正确性, 并得出以下结论。

1) 热泵设备的引入, 打破 CHP 的“以热定电”方式, 使得 CHP 的出力更加灵活, 加强了电热能源之间的耦合, 可有效提升风电的消纳空间。

2) 储能设备的引入, 可提升系统调节的灵活性, 有效提升风电的消纳, 有效降低综合能源系统购电和制热成本。

3) 考虑了热电综合需求响应, 可响应的电-热负荷在电价的引导下实现能量的转移, 进一步提升了风电的消纳能力, 降低了综合能源系统的运行成本。

4) 本文提出的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行方法, 构建了稳态电-热潮流, 加强了能源的耦合, 实现能量的梯级利用, 减少了污染物的排放, 提升了综合能源系统的经济效益。

## 参考文献

[1] CHICCO G, RIAZ S, MAZZA A, et al. Flexibility from distributed multienergy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1496-1517.

[2] WANG C, GONG Z H, WEI W, et al. Data-driven wind generation admissibility assessment of integrated electric-heat systems: a dynamic convex hull-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,

11(5): 4531-4543.

[3] NIKOOLBAKHT A, AGHAEI J, KHAH M S, et al. Minimizing wind power curtailment using a continuous-time risk-based model of generating units and bulk energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4833-4846.

[4] 杜先波, 陶苏滕, 刘述波, 等. 综合能源系统日前-日内多目标优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 109-117.

DU Xianbo, TAO Sumeng, LIU Shubo, et al. Day-ahead and intraday optimal control strategies of integrated energy system considering multiple objectives[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 109-117.

[5] LI C Y, YAO Y M, ZHAO C Y, et al. Multi-objective day-ahead scheduling of power market integrated with wind power producers considering heat and electricity trading and demand response programs[J]. IEEE Access, 2019, 7: 181213-181228.

[6] WU C Y, GU W, JIANG P, et al. Combined economic dispatch considering the time-delay of district heating network and multi-regional indoor temperature control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 118-127.

[7] YANG J W, BOTTERUD A, ZHANG N, et al. A cost-sharing approach for decentralized electricity-heat operation with renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1838-1847.

[8] 魏震波, 黄宇涵, 高红均, 等. 含电转气和热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3512-3520.

WEI Zhenbo, HUANG Yuhan, GAO Hongjun, et al. Joint economic scheduling of power-to-gas and thermoelectric decoupling CHP in regional energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3512-3520.

[9] 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.

[10] 孙宏宇, 张沛超, 陈永华. 基于消息总线的综合能源系统时间序列潮流的协同仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 76-83.

SUN Hongyu, ZHANG Peichao, CHEN Yonghua. A co-simulation method for time series energy flow of integrated energy system based on message bus[J]. Power

- System Protection and Control, 2020, 48(17): 76-83.
- [11] 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.
- [12] 谢华宝, 许丹, 胡林献, 等. 电锅炉配置方式对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 126-133.
- XIE Huabao, XU Dan, HU Linxian, et al. Study on effect of electric boiler configuration method on wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 126-133.
- [13] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1721.
- LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and Stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307-1721.
- [14] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: Relaxations and convexification—part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [15] ARCE H I, LOPEZ H S, PEREZ S L, et al. Models for fast modelling of district heating and cooling networks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 82(2): 1863-1873.
- [16] HE C, WU L, LIU T, et al. Co-optimization scheduling of interdependent power and gas systems with electricity and gas uncertainties[J]. Energy, 2018, 159: 1003-1015.
- [17] ZHOU Y, HU W, MIN Y, et al. Integrated power and heat dispatch considering available reserve of combined heat and power units[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1300-1310.
- [18] LI R, WEI W, MEI S W, et al. Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: an MPEC approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3641-3653.
- [19] 崔杨, 姜涛, 仲悟之, 等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2474-2483.
- CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Source-load coordination economic dispatch method for regional integrated energy system considering wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2474-2483.
- [20] LI J, WANG S, LIU Y, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [21] LI Y, YANG Z, LI G, et al. Optimal scheduling of an isolated microgrid with battery storage considering load and renewable generation uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1565-1575.
- [22] 阮文骏, 王蓓蓓, 李扬, 等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 86-93.
- RUAN Wenjun, WANG Beibei, LI Yang, et al. Customer response behavior in time-of-use price[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 86-93.
- [23] ZHANG X, SHAHIDEPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 592-601.
- [24] 孙强, 谢典, 聂青云, 等. 含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 79-88.
- SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.
- [25] LI R, CHEN L J, YUAN T J, et al. Optimal dispatch of zero-carbon-emission micro energy internet integrated with non-supplementary fired compressed air energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 566-580.

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-03-25

作者简介:

帅挽澜(1993—), 男, 硕士, 研究方向为综合能源系统优化; E-mail: 984070656@qq.com

朱自伟(1970—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为能源互联网、电力系统运行与控制。E-mail: zhuziwei@tsinghua.org.cn

(编辑 许威)