[文章编号] 1003－4684(2025)05-0036-07

考虑综合需求响应及氢能耦合的综合能源系统低碳优化调度

周意入，涂玲英，秦 宇，李 曦
（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为发掘用户需求侧的潜力，考虑综合能源系统多能耦合对需求侧的影响，建立了包含价格型与激励型需求响应的电－热－冷－气－氢优化调度模型。首先，针对柔性电负荷的特性，建立了基于分时电价弹性矩阵的价格型 *IDR* 模型。其次，考虑温度对冷、热负荷的影响，提出了基于阶梯型补贴的激励型 *IDR* 模型。然后，建立了以阶梯型补贴、设备运行、弃风、购能等成本之和最小为目标的 *IDR* 日前经济调度模型。最后，通过算例分析验证了模型的有效性。结果表明，该模型能够有效促进剩余风电消纳，实现了综合能源系统的低碳、环保、经济运行。

[关键词] 综合能源系统；综合需求响应；阶梯型补贴 IDR；日前调度
[中图分类号] TM73；TK01 [文献标识码] A

以电力系统为核心的综合能源系统(integrated energy system，IES)能耦合多种能源，是高效能源利用与减缓能源危机的重要途径[1-2]。IES 能实现电－热－冷－气等能源的多能互补，提高能源的利用效率[3]。多响应负荷的加入增加了 IES 的不确定性，同时也增加了柔性负荷的潜力[4]。

针对 IES，国内外学者进行了深入的研究。文献[5]以传统 IES 为核心，建立了电－热－冷区域 IES 优化调度模型。考虑冷负荷对 IES 调度的影响，文献[6]建立了以效率最大，运行成本和排放指标最低的精细化电－热－冷－气 IES 模型。文献[7]考虑多储能设备对 IES 的影响，结合设备的模型与功率平衡约束建立了多能互补的电－热－冷 IES 优化调度模型。碳交易机制引入有利于 IES 系统的低碳运行。文献[8]在电－热－气 IES 的基础上加入了碳交易机制，实现了 IES 的低碳化运行。文献[9]在碳交易的基础上加入了风电消纳，提升了系统的消纳能力和低碳运行能力。

上述研究未考虑需求响应对 IES 的影响。需求响应具有削峰填谷和提升电力系统运行效率的重要作用[10]。文献[11]建立了考虑电负荷与热负荷的电－热需求响应 IES 模型。考虑 IES 中电气相互转化和消纳新能源的能力。文献[12]提出了含电－气负荷需求响应的 IES 鲁棒优化调度模型。柔性负荷在 IES 调度中同样不能忽视。文献[13]以系统运行成本最低为目标建立了含电－热－气等柔性负荷和换电站的优化调度模型。上述文献考虑了各负荷需求响应对 IES 的影响，但未考虑到冷负荷的应用。

针对上述问题，本文为发挥需求侧的主动性，分别建立了基于分时弹性电价的价格型(integrated demand response，IDR)模型和阶梯补贴激励型 IDR 模型，同时考虑多设备的加入，建立了以各项成本之和最小为目标的电－热－冷－气－氢 IES 日前经济优化调度模型。最后通过仿真分析验证了本文策略的有效性。

1 综合需求响应模型

1.1 价格型 IDR 模型

价格型 IDR 指通过价格激励影响用户调整能源使用的手段，本模型仅针对用户侧电负荷模型，采用考虑分时电价的价格弹性矩阵法，采用调整平、谷、峰三个时段电价的方法来引导用户调整用电时间段，实现削峰填谷。电量－电价的弹性指标可用来表示电负荷－电价变化率，表达式如下：

$$P_a = \frac{\Delta U^e}{U^e}\left(\frac{\Delta c_p}{c_p}\right)^{-1} \tag{1}$$

式中：P_a 为电量－电价弹性指标；c_p、Δc_p 为平、谷、

[收稿日期] 2022－12－15
[基金项目] 国家自然科学基金(41601399)
[第一作者] 周意入(1996－)，男，重庆合川人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为综合能源系统优化。
[通信作者] 涂玲英(1963－)，女，湖北武汉人，湖北工业大学教授，研究方向为电子信息及嵌入式。

峰的价格与固定电价的差额；U^e 和 ΔU^e 为负荷前的用电量和负荷响应量。

分时电价与固定电价的弹性矩阵如下：

$$\boldsymbol{E}_e = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1m} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{nm} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$E_{ii} = \frac{\Delta U^i}{U^i}\left(\frac{\Delta c_{pi}}{c_{pi}}\right)^{-1} \tag{3}$$

$$E_{ij} = \frac{\Delta U^i}{U^i}\left(\frac{\Delta c_{pj}}{c_{pj}}\right)^{-1} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{E}_e$ 为电量电价弹性矩阵；E_{ii} 为自弹性系数；E_{ij} 为交叉弹性系数；c_{pi}、Δc_{pi} 和 c_{pj}、Δc_{pj} 分别为 i 时段和 j 时段的电价和电价变化量；U^i 和 ΔU^i 为 i 时段用户的电量及其变化量。

用户负荷响应量为：

$$\Delta U_{e,f} = \begin{pmatrix} U^0_{e,f} & 0 & 0 \\ 0 & U^0_{e,p} & 0 \\ 0 & 0 & U^0_{e,g} \end{pmatrix} \cdot N_e \begin{pmatrix} \Delta c_e^{pf}/c_{e,f}^{p0} \\ \Delta c_e^{pp}/c_{e,p}^{p0} \\ \Delta c_e^{pg}/c_{e,g}^{p0} \end{pmatrix} \cdot 0.5 \tag{5}$$

式中：$U^0_{e,f}$、$U^0_{e,p}$、$U^0_{e,g}$ 分别表示峰、平、谷在价格型激励前的用电量；ΔU_{ef} 表示在价格激励后的用电转移量；Δc_e^{pf}、Δc_e^{pp} 和 Δc_e^{pg} 表示分时电价与固定电价之间的差值；$c_{e,f}^{p0}$、$c_{e,p}^{p0}$、$c_{e,g}^{p0}$ 表示峰、平、谷分时电价。

1.2　激励型 IDR 模型

激励型 IDR 是指当 IES 处于用能负荷高峰阶段或者紧急时期时，用户可根据 IES 制定的激励补贴政策，选择将高峰时段或者紧急时段的负荷直接转移或者削减。

1.2.1　冷负荷响应模型　以夏季为例，对于用户的冷负荷响应模型，可采用热平衡方程进行表征。设在 t 时间段内，室内热量变化量 ΔQ 等于系统制冷量 L_c 与吸热量 Q_B 之差，则热平衡方程可描述为：

$$\Delta Q = Q_c - Q_B = \rho_{\text{air}} C_{\text{air}} V_B \frac{\mu_t T_c^{\text{IN}}}{\mu_t} \tag{6}$$

式中：C_{air} 为空气比热容；V_B 为建筑体积；ρ_{air} 为空气密度；$\mu_t T_c^{\text{IN}}/\mu_t$ 为室内温度变化率。

夏季建筑物室内温度及其波动需满足约束：

$$T^{\min}_{\text{IN},c,t} \leqslant T_t^{\text{IN},c} \leqslant T^{\max}_{\text{IN},c,t} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \alpha_t^{\text{in}-} = \dfrac{T^{\min}_{\text{IN},c,t} - T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t}}{\left| T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t} - T^{c}_{\text{IN},t} \right|} \\ \alpha_t^{\text{in}+} = \dfrac{T^{\max}_{\text{IN},c,t} - T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t}}{\left| T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t} - T^{c}_{\text{IN},t} \right|} \end{cases} \tag{8}$$

$$(1+\alpha_t^{\text{in}-})T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t} \leqslant T^{c}_{\text{IN},t} \leqslant (1+\alpha_t^{\text{in}+})T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t} \tag{9}$$

式中：$T^{\min}_{\text{IN},c,t}$ 和 $T^{\max}_{\text{IN},c,t}$ 分别表示夏季建筑物温度最小值和最大值；$T^{\text{opt}}_{\text{IN},c,t}$ 为设定的建筑内舒适温度；$\alpha_t^{\text{in}+}$ 和 $\alpha_t^{\text{in}-}$ 分别为室内温度波动相对最大最小值。

1.2.2　热负荷响应模型　室内、外温度与供暖功率需要满足：

$$\begin{cases} T^{\text{IN}}_{h,t+1} = T^{\text{IN}}_{h,t} e^{-\Delta t/\tau} + (RH_t^h + T^{\text{OUT}}_{h,t})(1 - e^{-\Delta t/\tau}) \\ \tau = RC_{\text{air}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：R 为建筑物等效热阻；H_t^h 为建筑物供热功率。由(10)可得：

$$H_t^h = R^{-1}\left(\frac{T^{\text{IN}}_{h,t+1} - e^{-\Delta t/\tau} T^{\text{IN}}_{h,t+1}}{1 - e^{-\Delta t/\tau}} - T^{\text{OUT}}_{h,t}\right) \tag{11}$$

同理，热负荷需要满足以下约束：

$$T^{\min}_{\text{IN},h,t} \leqslant T^{\text{IN}}_{h,t} \leqslant T^{\max}_{\text{IN},h,t} \tag{12}$$

$$\begin{cases} \beta_t^{\text{in}-} = \dfrac{T^{\min}_{\text{IN},h,t} - T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t}}{\left| T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t} - T^{\text{IN}}_{h,t} \right|} \\ \beta_t^{\text{in}+} = \dfrac{T^{\max}_{\text{IN},h,t} - T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t}}{\left| T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t} - T^{\text{IN}}_{h,t} \right|} \end{cases} \tag{13}$$

$$(1+\beta_t^{\text{in}-})T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t} \leqslant T^{\text{IN}}_{h,t} \leqslant (1+\beta_t^{\text{in}+})T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t} \tag{14}$$

式中：$T^{\min}_{\text{IN},h,t}$ 和 $T^{\text{IN}}_{h,t}$ 分别为冬季建筑室内温度最小值和最大值；$T^{\text{opt}}_{\text{IN},h,t}$ 为设定的冬季最舒适的室内温度；$\beta_t^{\text{in}+}$ 和 $\beta_t^{\text{in}-}$ 冬季温度波动相对值的最大值和最小值。

1.2.3　阶梯型补贴激励费用　根据用户冷热负荷反应程度的不同进行阶梯型补贴：

$$\begin{cases} F^{\text{IDR}}_{c,t} = \theta_c \left| U^0_{c,t} - U_{c,t} \right| \\ F^{\text{IDR}}_{h,t} = \theta_h \left| U^0_{h,t} - U_{h,t} \right| \end{cases} \tag{15}$$

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_c^1 & 0 < \left| U^0_{c,t} - U_{c,t} \right| < \varphi_c \\ \theta_c^2 & \left| U^0_{c,t} - U_{c,t} \right| > \varphi_c \end{cases} \tag{16}$$

$$\theta_h = \begin{cases} \theta_h^1 & 0 < \left| U^0_{h,t} - U_{h,t} \right| < \varphi_h \\ \theta_h^2 & \left| U^0_{h,t} - U_{h,t} \right| > \varphi_h \end{cases} \tag{17}$$

式中：$F^{\text{IDR}}_{c,t}$ 和 $F^{\text{IDR}}_{h,t}$ 分别为冷、热负荷的补贴费用；θ_c 和 θ_h 分别为冷热负荷的阶梯补贴系数；$U^0_{c,t}$ 和 $U_{c,t}$ 分别为初始冷负荷和响应后的实际冷负荷；$U^0_{h,t}$ 和 $U_{h,t}$ 分别为初始冷负荷和响应后的实际热负荷；φ_c 和 φ_h 分别为冷热负荷的划分边界。

1.2.4　激励型电负荷　激励型电负荷为可削减负荷，表达式如下：

$$F^{\text{IDR}}_{e,t} = c_{e,t}\varepsilon_e \Delta U^{\text{cut}}_{e,t} \tag{18}$$

式中：$F^{\text{IDR}}_{e,t}$ 为削减电负荷补贴费用；$c_{e,t}$ 表示 t 时段的电价；ε_e 为电荷的补贴系数；$\Delta U^{\text{cut}}_{e,t}$ 为削减的电负荷量。

2　计及综合需求响应的电—热—冷—气—氢 IES 优化模型

2.1　综合能源系统模型

2.1.1　氢能耦合

1)电制氢环节　电制氢气的设备电解槽(*EC*)模型为：

$$\begin{cases} P_t^{\text{EC},Q} = \eta^{\text{EC}} P_t^{\text{EC},e} \\ \eta^{\text{EC}} = \mu_i^{\text{EC}}\left(\dfrac{P_t^{\text{EC},e}}{P_t^{\text{EC},e,N}}\right)^i \\ P^{\min}_{\text{EC},e} \leqslant P_t^{\text{EC},e} \leqslant P^{\max}_{\text{EC},e} \\ P^{\text{down}}_{\text{EC},e} \leqslant P_t^{\text{EC},e} - P_{t-1}^{\text{EC},e} \leqslant P^{\text{up}}_{\text{EC},e} \end{cases} \tag{19}$$

式中：$P_t^{\mathrm{EC},e}$ 和 $P_t^{\mathrm{EC},Q}$ 分别为输入 EC 的电功率和输出的氢功率；η^{EC} 为 EC 的产氢效率；μ_i^{EC} 为产氢效率多项式；$P_t^{\mathrm{EC},e,N}$ 为 EC 额定功率；$P_{\mathrm{EC},e}^{\min}$ 和 $P_{\mathrm{EC},e}^{\max}$ 分别为 EC 输出电功率的最小值和最大值；$P_{\mathrm{EC},e}^{\mathrm{down}}$ 和 $P_{\mathrm{EC},e}^{\mathrm{up}}$ 分别为 EC 输出电功率的爬坡率下、上限。

2)氢制甲烷环节　MR 是氢制甲烷环节的主要核心设备，MR 的输入-输出模型表示如下：

$$\begin{cases} P_t^{\mathrm{gas,MR}} = \eta^{\mathrm{MR}} P_t^{Q,\mathrm{MR}} \\ P_{Q,\mathrm{MR}}^{\min} \leqslant P_t^{Q,\mathrm{MR}} \leqslant P_{Q,\mathrm{MR}}^{\max} \\ P_{Q,\mathrm{MR}}^{\mathrm{down}} \leqslant P_{\mathrm{MR},Q}^{t+1} - P_{\mathrm{MR},Q}^{t} \leqslant P_{Q,\mathrm{MR}}^{\mathrm{up}} \end{cases} \tag{20}$$

式中：$P_t^{Q,\mathrm{MR}}$ 和 $P_t^{\mathrm{gas,MR}}$ 分别为输入 *MR* 的氢功率和 *MR* 输出气功率；η^{MR} 为 *MR* 的转换效率；$P_{Q,\mathrm{MR}}^{\min}$ 和 $P_{Q,\mathrm{MR}}^{\max}$ 分别为 *MR* 输入氢功率的最小、最大值；$P_{Q,\mathrm{MR}}^{\mathrm{down}}$ 和 $P_{Q,\mathrm{MR}}^{\mathrm{up}}$ 分别为 MR 输入氢功率爬坡率的下、上限值。

3)氢制热、电环节建模　HFC 作为主要的氢能耦合设备，其具体关系可用如下公式表示：

$$\begin{cases} P_t^{HFC,e} = \eta^{\mathrm{H}}\mathrm{FC}_e P_t^{\mathrm{HFC},Q} \\ P_t^{HFC,h} = \eta^{\mathrm{H}}\mathrm{FC}_h P_t^{\mathrm{HFC},Q} \\ \eta^{\mathrm{H}}\mathrm{FC}_e = \mu_e^{HFC,i}\left(\dfrac{P_t^{\mathrm{HFC},e}}{P_t^{\mathrm{HFC},N}}\right)^i \\ \eta^{\mathrm{H}}\mathrm{FC}_h = \mu_h^{HFC,i}\left(\dfrac{P_t^{\mathrm{HFC},h}}{P_t^{\mathrm{HFC},Q}}\right)i \\ P_{\mathrm{HFC},Q}^{\min} \leqslant P_t^{\mathrm{HFC},Q} \leqslant P_{\mathrm{HFC},Q}^{\max} \\ P_{\mathrm{HFC},Q}^{\mathrm{down}} \leqslant P_{t+1}^{\mathrm{HFC},Q} - P_t^{\mathrm{HFC},Q} \leqslant P_{\mathrm{HFC},Q}^{\mathrm{up}} \end{cases} \tag{21}$$

式中：$P_t^{HFC,e}$ 和 $P_t^{HFC,h}$ 分别为 HFC 输出的电、热功率；$P_t^{\mathrm{HFC},Q}$ 为输入 HFC 的氢功率；$\eta^{\mathrm{H}}\mathrm{FC}_e$ 和 $\eta^{\mathrm{H}}\mathrm{FC}_h$ 分别为 HFC 的电、热功率转换效率，$\mu_e^{HFC,i}$、$\mu_h^{HFC,i}$ 分别为 HFC 发电、产热效率多项式系数；$P_{\mathrm{HFC},Q}^{\min}$ 和 $P_{\mathrm{HFC},Q}^{\max}$ 分别为输入 HFC 的氢功率最小、最大值；$P_{\mathrm{HFC},Q}^{down}$ 和 $P_{\mathrm{HFC},Q}^{\mathrm{up}}$ 分别为输入 HFC 的氢功率爬坡率最大、最小值。

2.1.2　冷热电联产

1)燃气轮机 GT 消耗的天然气功率与输出的电功率 $\mathrm{P}_{\mathrm{t}}^{GT}$ 之间的关系为：

$$G_t^{\mathrm{GT}} = x\,(P_t^{\mathrm{GT}})^2 + yP_t^{\mathrm{GT}} + zL_t^{\mathrm{GT}} \tag{22}$$

式中：G_t^{GT} 为 GT 消耗的天然气功率，P_t^{GT} 为 GT 在第 t 个时段内的输出电功率；L_t^{GT} 为 GT 的启停状态标记位，0 时为停机，1 为开机；x、y、z 为燃耗系数。

GT 制热特性模型为：

$$\begin{cases} H_t^{\mathrm{GT}} = P_t^{\mathrm{GT}}/\delta^{\mathrm{GT}} \\ P_t^{\mathrm{WHB}} = \lambda^h H_t^{\mathrm{GT}} \end{cases} \tag{23}$$

式中，H_t^{GT} 和 H_t^{WHB} 分别表示燃气轮机输出的热功率和余热锅炉(WHB)的输出热功率；δ^{GT} 和 λ^h 分别表示燃气轮机输出电热功率比和热回收效率。

$$\begin{cases} U_t^{\mathrm{GT}} P_{\mathrm{GT}}^{\min} \leqslant P_t^{\mathrm{GT}} \leqslant U_t^{\mathrm{GT}} P_{\mathrm{GT}}^{\max} \\ P_{\mathrm{GT}}^{\mathrm{down}} \leqslant P_t^{\mathrm{GT}} - P_{t-1}^{\mathrm{GT}} \leqslant P_{\mathrm{GT}}^{\mathrm{up}} \end{cases} \tag{24}$$

式中：$P_{\mathrm{GT}}^{\mathrm{up}}$、$P_{\mathrm{GT}}^{\mathrm{down}}$ 分别为 GT 的爬坡率上下限；$P_{\mathrm{GT}}^{\min}$、$P_{\mathrm{GT}}^{\max}$ 分别为 GT 的最小、大输出功率。

2)燃气锅炉 GB 模型

$$\begin{cases} P_t^{\mathrm{GB}} = \eta^{\mathrm{GB}} G_t^{\mathrm{GB}} \\ 0 \leqslant P_t^{\mathrm{GB}} \leqslant P_{\mathrm{GB}}^{\max} \end{cases} \tag{25}$$

式中：η^{GB} 为 GB 热效率；$P_{\mathrm{GB}}^{\max}$ 为 GB 的输出热功率上限。

3)吸收式制冷机 RS 模型

$$\begin{cases} P_t^{\mathrm{RS},c} = \eta^{\mathrm{RS}} P_t^{\mathrm{RS},h} \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{RS},t}^{h} \leqslant P_{\mathrm{RS},h}^{\max} \end{cases} \tag{26}$$

式中，$P_{h,\mathrm{RS}}^{\max}$ 和 η^{RS} 分别表示吸收式制冷机输入热功率和制冷效率。

4)电制冷机 *AC* 模型

$$\begin{cases} P_t^{\mathrm{AC},c} = \eta^{\mathrm{AC}} P_t^{\mathrm{AC},e} \\ 0 \leqslant P_t^{\mathrm{AC},e} \leqslant P_{\mathrm{AC},e}^{\max} \end{cases} \tag{27}$$

式中，η^{AC} 为 AC 的制冷系数，$P_{\mathrm{AC},e}^{\max}$ 为 AC 的电功率上限。

2.1.3　多储能环节

本文使用储热 HST、储氢 HES、储电 BT 三个设备组成模型如下：

$$\begin{cases} S_t^n = S_{t-1}^n(1-\chi_n) + (\eta_n^{\mathrm{IN}} P_{n,t}^{\mathrm{IN}} - P_{n,t}^{\mathrm{OUT}}/\eta_n^{\mathrm{OUT}}) \\ S_n^{\min} \leqslant S_t^n \leqslant S_n^{\max} \end{cases} \tag{28}$$

式中：$n \in \{\mathrm{BT}, \mathrm{HST}, \mathrm{HES}\}$；$S_t^n$ 为设备的容量状态；η_n^{IN}、η_n^{OUT} 分别为设备 n 的充、放能效率；χ_n 为设备 n 的能量自损系数；$S_n^{\min}$ 和 $S_n^{\max}$ 分别为设备 n 的容量上、下限。

各储能设备需要满足如下约束：

$$\begin{cases} L_{n,t}^{\mathrm{IN}} P_n^{\mathrm{IN,min}} \leqslant P_{n,t}^{\mathrm{IN}} \leqslant P_n^{\mathrm{IN,max}} L_{n,t}^{\mathrm{IN}} \\ L_{n,t}^{\mathrm{OUT}} P_n^{\mathrm{OUT,min}} \leqslant P_{n,t}^{\mathrm{OUT}} \leqslant P_n^{\mathrm{OUT,max}} L_{n,t}^{\mathrm{OUT}} \\ P_n^{\mathrm{IN,down}} \leqslant P_{n,t}^{\mathrm{IN}} - P_{n,t-1}^{\mathrm{IN}} \leqslant P_n^{\mathrm{IN},up} \\ P_n^{\mathrm{OUT,down}} \leqslant P_{n,t}^{\mathrm{OUT}} - P_{n,t-1}^{\mathrm{OUT}} \leqslant P_n^{\mathrm{OUT},up} \\ L_{n,t}^{\mathrm{OUT}} + L_{n,t}^{\mathrm{IN}} \leqslant 1 \end{cases} \tag{29}$$

式中：$P_{n,t}^{\mathrm{IN}}$、$P_{n,t}^{\mathrm{OUT}}$ 为各储能设备的充、放能功率；$P_n^{\mathrm{IN,max}}/P_n^{\mathrm{IN,min}}$、$P_n^{\mathrm{OUT,max}}/P_n^{\mathrm{OUT,min}}$ 分别为各储能装置充、放功率上/下限；$L_{n,t}^{\mathrm{IN}}$ 和 $L_{n,t}^{\mathrm{OUT}}$ 分别为各储能装置充、放功率状态标志位。此外，储电装置还需满足充放电频率约束：

$$\sum_{T=1}^{24} L_{\mathrm{BT},t}^{\mathrm{OUT}} + L_{\mathrm{BT},t}^{\mathrm{IN}} \leqslant t \tag{30}$$

2.2　目标函数

计及价格型 IDR 和激励型 IDR 的目标函数如：

$$\min F^{\mathrm{IES}} = F^{\mathrm{buy}} + F^{\mathrm{IDR}} + F^{\mathrm{OM}} + F^{\mathrm{win}} \tag{31}$$

式中：F^{IES} 为 IES 日前优化的总成本；F^{buy} 为购能成本；F^{IDR} 为激励响应补贴成本；F^{OM} 为设备运行成本；F^{win} 为弃风成本。

1)购能成本　该成本为 IES 运行过程中向外部电网和外部气网购能时产生的购能成本：

$$\begin{cases} F^{\text{buy}} = F^{\text{grid}} + F^{\text{gas}} \\ F^{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{24} (G_t^{\text{GT}} + G_t^{\text{GB}}) \lambda_t^{\text{gas}} \\ F^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^{24} P^{\text{buy}} c_{e,t} \end{cases} \tag{32}$$

2）激励型 IDR 补贴成本　该成本可表示为：

$$F^{\text{IDR}} = \sum_{t=1}^{24} (F_{e,t}^{\text{IDR}} + F_{h,t}^{\text{IDR}} + F_{c,t}^{\text{IDR}}) \tag{33}$$

3）运维成本

$$F^{\text{OM}} = \sum_{t=1}^{24} (\sum_m x_m P_t^m + \sum_j y_j (P_{j,t}^{\text{IN}} + P_{j,t}^{\text{OUT}})) \tag{34}$$

式中：m、j 分别为能源设备种类和多源储能装置种类；x_m 为能源转换设备维护系数；y_j 为储能设备维护系数；P_t^m 为能源转换设备 m 的输出功率；P_t^{IN} 和 P_t^{OUT} 为储能设备 j 的充、放功率。

4）弃风成本

$$F^{\text{win}} = \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{win},t}^{\max} + P_t^{\text{win}}) \tag{35}$$

2.3　约束条件

1）电功率平衡

$$\begin{aligned} &P_t^{\text{win}} + P_t^{\text{GT}} + P_t^{\text{buy}} + P_{\text{BT},t}^{\text{OUT}} + P_{\text{HFC},t}^{e} \\ &= U_{e,t} + P_{\text{BT},t}^{\text{IN}} + P_t^{\text{AC}} + P_t^{\text{EC}} \end{aligned} \tag{36}$$

式中：$U_{e,t}$ 为响应后实际电负荷；P_t^{win} 表示风机输出电功率。

2）热功率平衡

$$H_t^{\text{WHB}} + H_t^{\text{GB}} - H_t^{\text{AR}} + H_{\text{HST},t}^{\text{OUT}} = U_{h,t} + H_{\text{HST},t}^{\text{IN}} \tag{37}$$

3）冷功率平衡

$$Q_t^{\text{AR}} + Q_t^{\text{AC}} = U_{c,t} \tag{38}$$

4）氢功率平衡

$$P_t^{Q,\text{EC}} = P_t^{Q,\text{MR}} + P_t^{Q,HFC} + P_{HES,t}^{\text{OUT}} - P_{HES,t}^{\text{IN}} \tag{39}$$

5）天然气网络平衡

$$G_t^{\text{gas}} + P_{\text{MR},t}^{\text{gas}} = G_t^{\text{GT}} + G_t^{\text{GB}} \tag{40}$$

3　算例分析

为验证本文所提计及综合需求响应的电−热−冷−氢 IES 优化调度的有效性，以某含氢能的 IES 为例进行算例仿真。IES 内部各设备仿真参数如表 1 所示；用户电、热、冷负荷曲线和风机预测出力如图 1 所示；分时电价如表 2 所示；电价 IDR 自弹性系数为−0.1，交叉弹性系数为 0.03；在冬季热负荷 IDR 方面，$T^{\min}$，h_{in} 选取 19℃，$T_{\text{in}}^{\max,h}$ 取 25℃，负荷侧最佳室内温度设定为 22.5℃；C_{air} 为 1 kJ/(kg·℃)；在夏季冷负荷 IDR 方面，建筑物热源与光照强度相关公式可见文献[14-15]，$T_{c,\text{in}}^{\min}$ 选取 18℃，$T_{c,\text{in}}^{\max}$ 取 24℃，负荷侧最佳室内温度同样设定为 22.5℃；ρ_{air} 为 1.2 kg/m^3；负荷补贴系数 θ_e、$\theta_{h/c}^1$、$\theta_{h/c}^2$ 分别为 0.04、0.03、0.05。

表 1　IES 模型内部设备参数

参数	取值
h^{GB}	0.9
δ^{GT}	0.85
λ^h	0.35
$P_{\text{Q},MR}^{max}/P_{\text{Q},MR}^{\min}$	250/0
x,y,z	3.28,66.2,100
h^{EC}	0.88
h^{MR}	0.6
$P_{\text{AC},c}^{max}$	150
h_{HST}^{IN}，h_{HST}^{OUT}	0.98,0.98
h_{BT}^{IN}，h_{BT}^{OUT}	0.95,0.95
$H_{\text{HST}}^{IN,\min}$，$H_{\text{HST}}^{IN,max}$	0,20
g_m	0.02
$P_{\text{GT}}^{max}/P_{\text{GT}}^{\min}$	1000/0
$H_{\text{GB}}^{max}/H_{\text{GB}}^{\min}$	1200/0
$P_{\text{EC},e}^{max}/P_{\text{EC},e}^{\min}$	400/0
$P_{HFC,\text{Q}}^{max}/P_{HFC,\text{Q}}^{\min}$	300/0
h^{AC}	3
h^{RS}	1.2
$P_{\text{RS},c}^{max}$	500
$P_{\text{Q},MR}^{max}$	250
$P_{\text{g,buy}}^{max}$	1000
$P_{\text{BT}}^{IN,\min}$，$P_{\text{BT}}^{IN,max}$	0,350
$P_{\text{BT}}^{OUT,\min}$，$P_{\text{BT}}^{OUT,max}$	0,350
$H_{\text{HST}}^{OUT,\min}$，$H_{\text{HST}}^{OUT,max}$	0,300

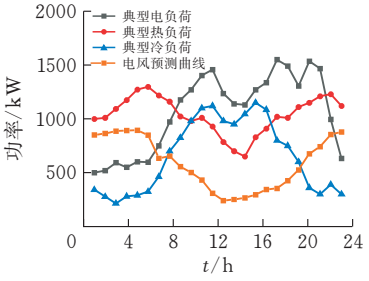


图 1　电−热−冷初始负荷及其风电预测曲线

表 2　分时电价

时段	时间段	购电价格/元	售电价格/元
峰	8:00−10:00 14:00−15:00 19:00−20:00	1.25	0.5
平	6:00−7:00 11:00−13:00 16:00−18:00	0.8	0.5
谷	21:00	0.4	0.5

3.1　氢能耦合分析

为了验证氢能利用环节对提升系统环境效益和经济效益的有效性，特设置以下三种场景进行对比分析。

场景 1：采用传统的冷热电联产优化调度模型，未引入多源储能设备；

场景 2：含多源储能设备的传统电−热−气优化调度模型；

场景 3：在方案 2 的基础上，引入氢能利用

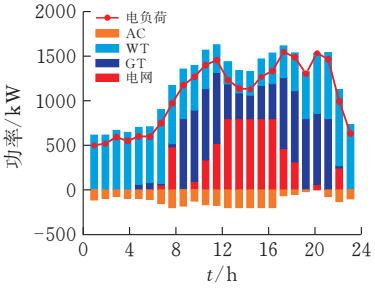
环节。

三种场景下的 IES 优化调度结果如表 3 所示。

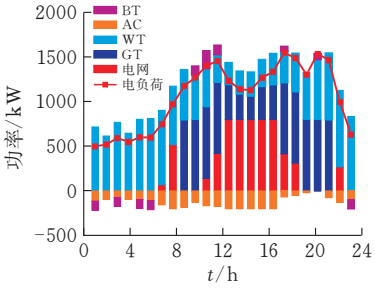
表 3 不同调度场景下的 IES 各成本对比分析

参数	场景 1	场景 2	场景 3
IES 购气成本/元	17459.3	17004.5	16224.1
IES 购电成本/元	5502.5	4945.8	4840.1
IES 弃风成本/元	784.3	462.5	0
IES 运维成本/元	3032.3	3203.7	3531.6
IES 碳排放量/kg	12869.7	12321.5	11828.4
IES 总成本/元	26778.4	25616.5	24595.8

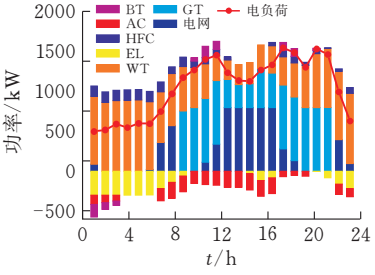
三种调度场景的优化成本对比结果如表 3 所示。其中分别对比了 IES 的购气成本、购电成本、弃风成本、运行维护成本以及 IES 的总成本。图 2 为三种调度场景下的电能调度结果图。图 3 为三种调度场景下的风电功率消纳结果图。



(a)场景 1 的电能调度结果



(b)场景 2 的电能调度结果



(c)场景 3 的电能调度结果

图 2 三种情况下调度结果

首先对比场景 1 和场景 2。由表 3 可知，场景 2 中 IES 总成本、购能成本和弃风成本相比场景 1 分别下降了 4.33%、4.41%和 41.3%，并且系统总的碳排放量也下降了 4.25%。其原因为：场景 1 未引入多源储能设备，因此在用能负荷高峰时期会导致 IES 承担较大的能源供应压力，并产生大量的外购电力成本，导致了 IES 的购能成本较高。而对于场景 2，由图 2b 可看出，在 IES 模型中引入蓄电池之后，蓄电池能在用户的电负荷高峰阶段如 10:00－12:00 以及 18:00、21:00 等时段放电，能有效缓解供能压力。而在用户电负荷低谷阶段如 23:00－06:00 时段进行充电，提升风电的消纳能力和能源利用效率。此外，由图 3 的风电消纳结果可知，由于本算例的风电出力具有反调峰特性，在夜间出力较多。因此，在场景 1 的情况下，由于在 23:00－6:00 等时段风电功率较高，而该阶段的用户电负荷又反而偏低，故会产生较多弃风功率，导致能源利用度不高，使运行成本上升。而对于场景 2，通过引入储能设备，能在电负荷较低时段通过储能装置消纳富裕的风电，虽然储能装置的容量有限，但也能有效提升风电的消纳能力，提高了能源利用效率。

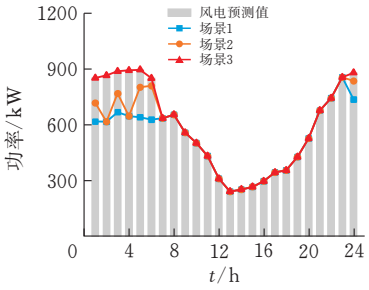


图 3 三种场景风电消纳情况

对比场景 2 和场景 3。由表 3 可见，相比于场景 2，在场景 3 中，其 IES 的总成本、购能成本分别下降了 3.98%、4.03%，且风电资源被完全消纳，弃风成本降为 0。此外，系统的碳排放量总量也下降了 4.01%。对于场景 3，由于引入了以氢燃料电池、电解槽以及甲烷反应器构成的氢能耦合系统，电－热－冷－氢 IES 首先会将富裕的风电资源输入进电解槽中制氢，通过电解槽产生氢气，一部分可输送至氢燃料电池中进行热、电生产，另外一部分可输送至甲烷反应器中合成天然气供气。通过上述步骤，可将夜间大量的风电资源转换成氢气，提高能源利用效率，实现了电－热－冷－气－氢耦合。结合图 2、图 3 和表 3 可以看出，在夜间时段，由于夜间风电功率处于峰值，因此该时段可通过电解槽将富裕的风电吸收，转换为氢能提供给氢能利用环节，故风电功率几乎被全部消纳。并且由于氢能的高效、清洁特性，引入氢能系统也能有效降低系统的碳排放量。此外，由于将生成的氢能通过氢燃料电池直接产热和产电供给用户，相比将氢能通过甲烷反应器合成天然气再输送至燃气轮机或者燃气锅炉等燃气机组，能够减少一个能量转换环节，故 IES 为了提升能源利用效率，会优先选择将生产的氢能输送至氢燃料电池中进行热电生产，再将剩余部分输送至其他设备，实

现了能源利用效率最大化。

3.2　综合需求响应分析

为验证本文所提的价格型 IDR 模型和激励型 IDR 模型在提升 IES 经济性和环保性方面的有效性，以场景 3 为基础，增设场景 4 和场景 5（本文场景）与场景 3 进行对比分析，对比结果如表 3 所示。

场景 4：只考虑价格型 IDR 模型的 IES 优化调度模型。

场景 5：考虑价格型 IDR 和激励型 IDR 的 IES 优化调度模型。

首先分析场景 3 和场景 4。场景 4 在场景 3 的基础上，引入了价格型 IDR 模型，故仅有电负荷参与响应。由表 4 可见，相比场景 3，场景 4 的 IES 总成本、购能成本分别下降了 3.27%和 3.26%，并且系统的碳排放总量下降了 4.21%。其原因如下：当考虑价格型 IDR 策略后，用户能够根据 IES 的分时电价策略，合理的调整自身用电行为，降低购能成本，实现了削峰填谷。而场景 3 由于未考虑需求侧响应，因此在高峰用电时段会导致较高的购能成本和碳排放量。

表 4　不同策略下的对比结果

参数	场景 3	场景 4	场景 5
IES 购气成本/元	16224.1	15965.1	14469.5
IES 购电成本/元	4840.1	4412.2	4382.7
IES 弃风成本/元	0	0	0
IES 运行维护成本/元	3531.6	3412.5	3124.8
激励型补贴成本/元	0	0	776.5
系统总碳排放量/kg	11828.4	11329.6	10651.3
IES 总成本/元	24595.8	23789.8	22753.5

对比场景 4 和场景 5，其中场景 5 即本文场景。由表 4 可计算出，场景 5 相比场景 4，其 IES 总成本、系统购能成本以及碳排放量总量分别下降了 4.35%、3.09%以及 5.98%。对于场景 5，其需求响应模型不仅引入了价格型 IDR 模型，还进一步引入了激励型 IDR 模型。激励型 IDR 模型能在价格型 IDR 模型的基础上，根据 IES 的激励补贴政策，能够使多种负荷同时参与响应并进行转移或者削减，并且电、热、冷负荷在响应的同时会相互替代，能进一步加大用户参与需求响应的能力。

综上可知，通过引入价格型 IDR 和激励型 IDR 的多类型 IDR 策略不仅有效地降低了 IES 的购电、购气成本，同时也降低了 IES 的碳排放总量。

3.3　IDR 调度结果

由图 4 可知，对于仅考虑价格型 IDR 策略来说，在电价较高时段，即 11:00－12:00 以及 18:00－22:00 时段，此时 IES 为了降低购能成本和碳排放量，选择将该时段的电负荷转移至 23:00－次日 7:00 的电价谷时段，有效地降低了电负荷峰谷差。当引入激励型电负荷时，在高峰时段的电负荷量进一步下降，电负荷的峰谷差得到更有效的平衡。

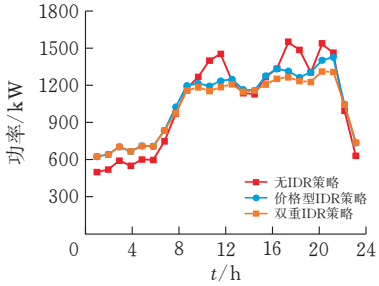
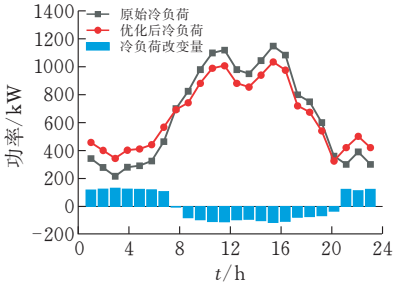
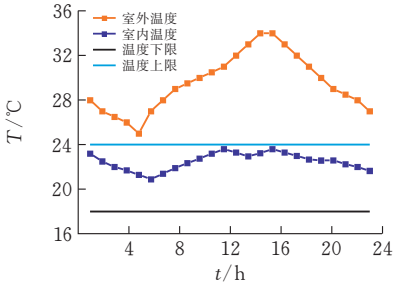


图 4　IDR 后电负荷优化结果

接下来分析热、冷负荷的响应结果。首先分析夏季冷负荷的响应结果，图 5 为夏季的室内、外温度以及冷负荷优化结果。其中黄色曲线为夏季室外温度，紫色曲线为室内温度。若不引入柔性冷负荷，假设建筑物室内温度始终维持于 22.5℃，则冷负荷保持恒定不变。当引入柔性冷负荷时，建筑物的室内温度在规定范围内即 18℃～24℃内可变。



(a)冷负荷优化结果



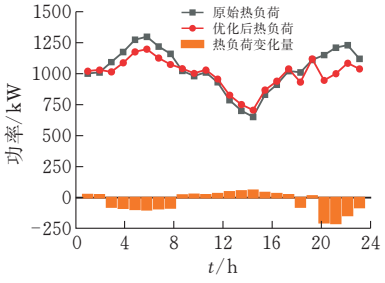
(b)温度变化结果

图 5　冷负荷优化结果

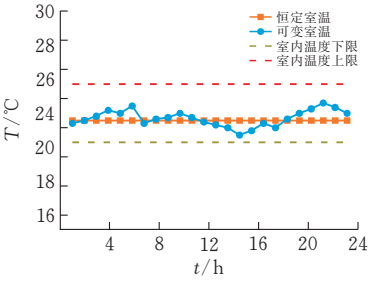
由图 5 可知，在引入柔性冷负荷的情况下，室内温度会在用户温度舒适度范围内进行调节，其变化趋势和用户冷负荷趋势相似，如图 5b 中紫色曲线所示。对于图 5a 可知，由于在夜间电价较低时段，IES 通过降低室内温度储存一部分热量，故选择增大用户谷时段的冷负荷需求。而在白天电价较高的时段，IES 通过升高温度释放在电价谷时段存储的热量，以降低用户在电价高峰时段的冷负荷需求。由于冷、热负荷的响应特性与实际储能装置相似系统，可通过将峰值的用电能量转移至谷时段，以减少制

冷设备的用电费用，从而提高 IES 的经济性。

图 6 分别为冬季室内温度保持恒定和室内温度变化的两种场景下的热负荷优化结果。黑色曲线和红色曲线分别为考虑柔性热负荷前后的用户热负荷需求量。橙色曲线表示室内温度保持在恒定的最佳舒适温度，即不考虑热负荷的柔性特征。蓝色曲线表示室内温度变化，即考虑了柔性热负荷。为保证用户的温度舒适度，其室内温度只在一定区间内发生改变。由图 6a 可知，由于人体对温度感知的模糊性，当考虑了柔性热负荷时，随着室内温度在设定区间内发生一定的变化，热负荷也会出现改变。由图可知，用户的热负荷会出现削峰填谷的趋势，如在 1:00－8:00 和 21:00－24:00 热负荷较高的时段，热负荷出现了一定的削减，而在 12:00－17:00 热负荷较低时段，热负荷出现了一定的上升。由此可见，考虑柔性热负荷时，用户能在一定室温变化范围内合理调整自身用能策略，有效平滑了热负荷曲线。



(a)热负荷优化结果



(b)室内温度变化结果

图 6 热负荷优化结果

4 结论

本文构建了计及价格型 IDR 和激励型 IDR 的电–热–冷–氢 IES 优化调度策略，分别考虑了电、热、冷三种负荷的柔性特性及其响应能力，建立了价格型 IDR 模型和激励型 IDR 模型。算例仿真设置了五种场景进行对比分析，得到如下结论：1)在 IES 中引入氢能耦合系统，建立了氢能利用的能源转换模型，充分挖掘了氢能的能源利用潜力。仿真表明，氢能的有效利用不仅能促进可再生能源的消纳，还能发挥氢能高效清洁的优势，减少了系统的碳排放量。2)将需求侧电、热、冷负荷作为柔性负荷参与 IDR 中，不仅可以有效降低负荷的峰谷差，还能提高 IES 的经济性和环保性。3)建立的精细化冷、热柔性负荷模型，考虑了蓄热能力、室外/室内温度以及太阳辐射等多种因素，以及用户室内温度波动而产生的影响，可有效精准地描述用户负荷在实际生活中的可调度特性和用能特性。

[参 考 文 献]

[1] 骆钊，刘德文，沈鑫，等.综合能源系统优化运行技术研究综述[J].电力建设，2022，43(12)：3-14.

[2] 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(04)：383-397.

[3] 马喜平，沈渭程，甄文喜，等.基于低碳目标的电气综合能源系统优化调度策略研究[J].电网与清洁能源，2021，37(12)：116-122.

[4] 刘海涛，朱海南，李丰硕，等.计及碳成本的电–气–热–氢综合能源系统经济运行策略[J].电力建设，2021，42(12)：21-29.

[5] 于波，吴亮，卢欣，等.区域综合能源系统优化调度方法[J].电力建设，2016，37(01)：70-76.

[6] 钟永洁，孙永辉，谢东亮，等.含电–热–气–冷子系统的区域综合能源系统多场景优化调度[J].电力系统自动化，2019，43(12)：76-84.

[7] 欧阳斌，袁志昌，陆超，等.考虑源–荷–储多能互补的冷–热–电综合能源系统优化运行研究[J].发电技术，2020，41(01)：19-29.

[8] 杨秀，柴梓轩，刘方，等.考虑热动态和碳交易的电–气–热综合能源系统协调调度[J].电测与仪表，2021，58(11)：49-58.

[9] 陈曦，袁梦玲，王松，等.考虑碳交易影响风电消纳的综合能源系统优化运行[J].重庆理工大学学报(自然科学)，2022，36(01)：268-276.

[10] 荆朝霞，胡荣兴，袁灼新，等.含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J].电力系统自动化，2017，41(01)：65-72.

[11] 林佳兴，孙亮，李佳雯，等.计及电热综合需求响应的综合能源系统优化调度[J].电测与仪表，2022，59(09)：16-22.

[12] 章健，张玉晓，朱永胜，等.计及 DR 的电–气综合能源系统的鲁棒优化调度[J].郑州大学学报(工学版)，2020，41(06)：66-72.

[13] 孟国情，邱晓燕，张明珂，等.计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度[J].电子测量技术，2023，46(14)：138-145.

[14] 王瑞，程杉，刘烨，等.基于综合需求响应和奖惩阶梯碳交易的能源枢纽主从博弈优化调度[J].电力系统保护与控制，2022，50(08)：75-85

[15] 靳小龙，穆云飞，贾宏杰，等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报，2017，37(02)：581-591.

(下转第 50 页)