考虑供需灵活响应的园区综合能源系统优化调度

马 雁[1], 侯 娟[1], 王 非[2], 辛业春[3]
(1.郑州电力高等专科学校 电力工程学院, 河南 郑州 450000; 2.国家电投集团河南电力有限公司 技术信息中心, 河南 郑州 450000; 3.东北电力大学 电力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 深度挖掘柔性资源的响应潜力,可以提升园区综合能源系统(Park Integrated Energy System,PIES)运行的经济性、灵活性与低碳性。为此,文章提出一种考虑供需灵活响应的 PIES 优化调度策略。首先,在分析设备动态能效特性的基础上,引入有机闪蒸循环和电热锅炉建立热电联产(Combined Heat and Power,CHP)机组多模态且变工况运行的供给侧灵活响应模型;然后,基于多级阶梯激励补偿机制,在负荷侧建立削减、替代与转移柔性负荷差异化配比的电-冷-热多元需求响应模型;最后,以日运行成本最小为优化目标,构建 PIES 供需灵活响应的协调优化模型。仿真分析表明,文章所提策略不仅可以提高调度模型的准确度,还可以在促进风电消纳的同时,实现系统经济性、低碳性,供能可靠性、满意度的多维度优化平衡。

关键词: 园区综合能源系统; 供需灵活响应; 有机闪蒸循环; 变工况; 协调优化
中图分类号: TK81; TM712 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671-5292(2026)01-0131-12

0 引言

为实现“双碳”目标,亟须深化能源体系的低碳清洁化转型,充分发挥供能、需求双侧柔性资源的调节潜力[1,2]。园区综合能源系统(PIES)作为一种有机融合热、冷、电等能源的新型多能耦合系统[3],依托能源的梯级利用和统筹优化,可以有效推动传统能源结构的升级改造,成为实现“双碳”目标的重要技术支撑。

热电联产(CHP)作为一种热、电协同供应的高能效技术,在 PIES 中得到广泛应用[4]。研究指出,CHP 机组固有的刚性热电联产特性将显著制约其在源荷双侧动态响应过程中的灵活适配能力,进而影响多元负荷需求场景下多能流协同优化的全局供能经济性。为此,国内外学者提出了多种热、电解耦策略。文献[5,6]利用储热罐储能时移特性,显著提升了机组调峰能力。文献[7,8]通过配置电热锅炉(Electric Boiler,EB)将冗余电能转化为热能补偿供应,优化了热、电协同供给效率。文献[9,10]在热负荷低谷期通过有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle,ORC)实现余热发电转换,拓展了机组出力调节维度。文献[11-13]通过引入 EB 和 ORC 机组两种设备打破 CHP 机组的电、热刚性耦合,不仅能缓解机组电能过剩问题,还能对热能冗余工况进行有效调控。上述研究虽在一定程度上改善了系统的供能灵活性, 但解耦 CHP 机组中的能源设备均以固定能效运行,这会使得 PIES 的优化效果过于理想化。此外,引入 ORC 虽可以有效利用 CHP 中的低温余热[4],但在中低温余热利用方面, 混合工质有机闪蒸循环(Organic Flash Cycle,OFC)可以实现比 ORC 更高的热回收效率[14]。目前,关于 OFC 对 PIES 运行优化的影响有待进一步研究。

与 CHP 热、电灵活输出的供给侧响应类似,综合需求响应 (Integrated Demand Response,IDR)作为挖掘需求侧柔性资源潜力的有效技术手段,在平抑多元负荷波动、优化系统运行效益方面具有重要的作用[15]。文献[16]基于响应激励机制建立电-冷-热 IDR 模型,有效降低了 PIES 的能源成本。文献 [17,18] 构建了一个多能源 IDR 模型, 验证了 IDR 在改善系统能耗和平滑负荷曲线方面的有效性。文献[19]建立了考虑负荷感知模糊性的精细化 IDR 模型,实现了 PIES 的“削峰填谷”。上述文献虽验证了 IDR 对 PIES 优化运行的有效性,但未考虑削减、转移等不同类型柔性负荷响应比例变化对 PIES 运行效益的影响。此外,上述研究仅考虑了需求侧柔性资源的调节特性, 没有考虑与供给侧柔

收稿日期: 2025-01-10。
基金项目: 国家自然科学基金(12105351);河南省校企研发中心“双碳技术校企研发中心”科研项目。
作者简介: 马 雁(1982-),女,硕士,副教授,研究方向为发电厂及电力系统电气设备运行。E-mail:425932040@qq.com

性资源的协调优化,这会导致 PIES 的运行灵活性在一定程度上受限。

针对上述研究的局限性，本文提出基于供、需双侧协同响应的 PIES 优化调控策略。首先,在分析设备动态能效特性的基础上，引入 OFC 和 EB 建立 CHP 机组多模态且变工况运行的供给侧灵活响应模型;然后,基于多级阶梯激励补偿机制,在负荷侧建立削减、替代与转移柔性负荷差异化配比的电-冷-热多元 IDR 模型,实现柔性资源的深度挖掘;最后,建立以日运行成本最小为目标的 PIES 优化模型。仿真结果表明,本文所提供需协调优化策略不仅可以提高调度模型的准确度,还可以提升风电消纳,实现 PIES 经济性、低碳性,供能可靠性、满意度的多维度优化平衡。

1 PIES 结构框架

本文构建的 PIES 结构框架如图 1 所示。外部能源输入端包括风机(Wind Turbine,WT)、上级气网和电网,三者共同构成了 PIES 的天然气、电力供应系统。能源转换端包括燃气锅炉(Gas Boiler,GB)、吸收式制冷机 (Absorption Chiller,AC)、电制冷机(Electric Chiller,EC)和热电解耦 CHP 机组,其中,OFC,EB,余热锅炉(Waste Heat Boiler,WHB)和燃气轮机(Gas Turbine,GT)共同组成了 CHP 的热电灵活响应环节。储能侧包括储热罐 (Thermal Storage Tank,TST) 和蓄电池(Battery Storage Tank,BST)。能源需求侧包括常规和柔性热、电、冷负荷。

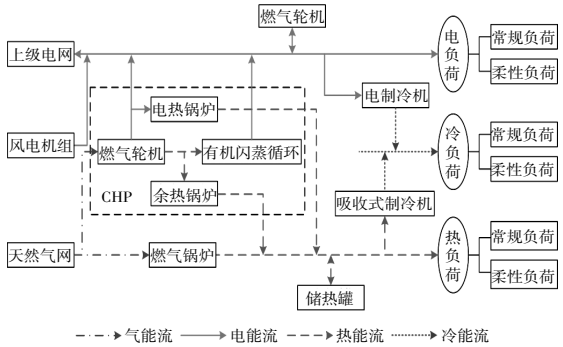


图 1 PIES 架构

Fig.1 Architecture of PIES

2 基于 OFC 和 EB 的供给侧灵活响应模型

传统的 GT 和 WHB 在进行热、电联供时,通常以恒定热、电比的模式运行,这会导致系统的电-热功率输出呈现强耦合特性，缺乏灵活调度的能力。因此,本研究通过集成 OFC 与 EB 构建余热-电能梯级二次回收系统,解除热、电联供的强耦合机制,建立热能、电能灵活输出的供能侧响应模型。考虑到 OFC,GT,EB 和 WHB 的运行效率易受外界环境、负载率等因素的影响,具有显著的变工况非线性特性,为了提升模型的精确性,避免解耦效果过于偏离实际工况,在本研究 CHP 中的能源转换设备均采用变工况模型。基于 OFC 和 EB 的 CHP 机组变工况数学模型表示如下。

①GT 变工况模型

本文采用三阶多项式来拟合 GT 发电、制热效率与负载率之间的非线性关系:

$$\begin{cases} P_{GT}^{e}(t)=\eta_{GT}^{e}P_{GT}^{g}(t) \\ P_{GT}^{h}(t)=\eta_{GT}^{h}P_{GT}^{g}(t) \\ \eta_{GT}^{e}(t)=\sum_{n=0}^{3}\left[a_{GT}^{e,n}R_{GT}^{e,n}(t)\right] \\ \eta_{GT}^{h}(t)=\sum_{n=0}^{3}\left[a_{GT}^{h,n}R_{GT}^{h,n}(t)\right] \end{cases} \tag{1}$$

式中:$P_{GT}^{e}(t)$,$P_{GT}^{h}(t)$分别为 GT 输出的电能、热能;$P_{GT}^{g}(t)$ 为 GT 消耗的燃气功率;η_{GT}^{e},η_{GT}^{h}分别为 GT 的电、热效率;$a_{GT}^{e,n}$,$a_{GT}^{h,n}$分别为 GT 的电、热效率的拟合系数;$R_{GT}^{e,n}(t)$,$R_{GT}^{h,n}(t)$分别为 GT 的电、热负载率。

②EB 变工况模型

本文采用三阶多项式来拟合 EB 制热效率与负载率之间的非线性关系:

$$\begin{cases} P_{EB}^{h}(t)=\eta_{EB}(t)P_{EB}^{e}(t) \\ \eta_{EB}(t)=\sum_{n=0}^{3}\left[a_{EB}^{n}R_{EB}^{n}(t)\right] \end{cases} \tag{2}$$

式中:$P_{EB}^{e}(t)$为 EB 的耗电量;$P_{EB}^{h}(t)$为 EB 的制热量;$\eta_{EB}(t)$为 EB 的制热效率;a_{EB}^{n}为制热效率拟合系数;$R_{GT}^{e,n}(t)$为 EB 的负载率。

③WHB 变工况模型

本文采用二阶多项式来拟合 WHB 热回收效率与负载率之间的非线性关系:

$$\begin{cases} P_{WHB}^{h}(t)=\eta_{WHB}(t)P_{whb}^{h}(t) \\ \eta_{WHB}(t)=\sum_{n=0}^{2}\left[a_{WHB}^{n}R_{WHB}^{n}(t)\right] \end{cases} \tag{3}$$

式中:$P_{\mathrm{whb}}^{\mathrm{h}}(t)$,$P_{\mathrm{WHB}}^{\mathrm{h}}(t)$分别为 WHB 回收和输出的热能;$\eta_{\mathrm{WHB}}(t)$为余热回收系数;$a_{\mathrm{WHB}}^{n}$为效率拟合系数;$R_{\mathrm{WHB}}^{n}(t)$为 WHB 的负载率。

④OFC 变工况模型

OFC 机组是一种利用混合工质驱动发电机的热力循环系统,是在 ORC 的基础上,引入闪蒸装置对其进行改进的一种循环发电装置。与 ORC 相比,OFC 有效改善了工质和热源的温度匹配,回收过程中热损失更小,效率更优。因此,本文选用 OFC 机组替代 ORC 机组作为余热回收装置,以提高能源利用率,并参考文献[20]对 OFC 的余热发电过程进行数学建模。

热源通过蒸发器传递给工质的热功率,即热回收功率为

$$P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{h}}(t)=m(t)\left[h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{out}}(t)-h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{in}}(t)\right] \tag{4}$$

式中:$P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{h}}(t)$为 OFC 机组消耗的热能;$m(t)$为工质质量流量;$h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{in}}(t)$,$h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{out}}(t)$分别为蒸发器入口、出口的焓值。

工质经加热和闪蒸后得到气、液混合物,气、液混合物进入膨胀机中做功。膨胀机输出的功率为

$$W_1(t)=m(t)\theta(t)\left[h_{\mathrm{e}}^{\mathrm{out}}(t)-h_{\mathrm{e}}^{\mathrm{in}}(t)\right] \tag{5}$$

式中:$W_1(t)$为膨胀机输出的功率;$\theta(t)$为闪蒸干度;$h_{\mathrm{e}}^{\mathrm{in}}(t)$,$h_{\mathrm{e}}^{\mathrm{out}}(t)$分别为膨胀机入口、出口的焓值。

工质泵将液态工质从冷凝压力提升至蒸发压力消耗的功为

$$W_2(t)=m(t)\left[h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{in}}(t)-h_{\mathrm{b}}^{\mathrm{in}}(t)\right] \tag{6}$$

式中:$W_2(t)$为工质泵消耗的功率;$h_{\mathrm{b}}^{\mathrm{in}}(t)$为工质泵入口的焓值。

OFC 的发电功率为

$$P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{e}}(t)=\eta_{\mathrm{en}}\left[W_1(t)-W_2(t)\right] \tag{7}$$

式中:$P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{e}}(t)$为 OFC 输出的电能;$\eta_{\mathrm{en}}$为发电机的效率。

由此可以得到 OFC 机组的热回收与发电功率间的关系为

$$P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{e}}(t)=\frac{\eta_{\mathrm{en}}\left[W_1(t)-W_2(t)\right]}{m(t)\left[h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{out}}(t)-h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{in}}(t)\right]} \tag{8}$$

令 $\eta_{\mathrm{OFC}}(t)=\dfrac{\eta_{\mathrm{en}}\left[W_1(t)-W_2(t)\right]}{m(t)\left[h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{out}}(t)-h_{\mathrm{z}}^{\mathrm{in}}(t)\right]}$,则 OFC 的模型可简化为

$$P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{e}}(t)=\eta_{\mathrm{OFC}}(t)P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{h}}(t) \tag{9}$$

本文采用二阶多项式来拟合 OFC 电效率与负载率之间的非线性关系,具体表示为

$$\eta_{\mathrm{OFC}}(t)=\sum_{n=0}^{2}\left[a_{\mathrm{OFC}}^{n}R_{\mathrm{OFC}}^{n}(t)\right] \tag{10}$$

式中:a_{OFC}^{n}为效率拟合系数;$R_{\mathrm{OFC}}^{n}(t)$为 OFC 机组的负载率。

⑤GT 和 CHP 的能量输出模型

在得到各设备的能流关系后,可以推导 GT 的电、热能实际流向,其中,GT 的电能流向 EB 和电能子系统,GT 的热能流向 OFC 和 WHB,具体表示为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{GT}}^{\mathrm{e}}(t)=P_{\mathrm{EN}}^{\mathrm{e}}(t)+P_{\mathrm{EB}}^{\mathrm{e}}(t)\\ P_{\mathrm{GT}}^{\mathrm{h}}(t)=P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{h}}(t)+P_{\mathrm{whb}}^{\mathrm{h}}(t)\end{cases} \tag{11}$$

式中:$P_{\mathrm{EN}}^{\mathrm{e}}(t)$为 GT 输入电能子系统中的电能。

引入 OFC 和 EB 后,CHP 机组的最终热、电能输出模型可表示为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}(t)=P_{\mathrm{EN}}^{\mathrm{e}}(t)+P_{\mathrm{OFC}}^{\mathrm{e}}(t)\\ P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{h}}(t)=P_{\mathrm{EB}}^{\mathrm{h}}(t)+P_{\mathrm{WHB}}^{\mathrm{h}}(t)\end{cases} \tag{12}$$

式中:$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}(t)$,$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{h}}(t)$分别为 CHP 机组输出的电、热能。

3　需求侧灵活响应模型

为充分挖掘 PIES 需求侧柔性资源的响应潜力,本文考虑电、热、冷 3 类负荷均具备替代,削减和转移响应特性,在此基础上,引入柔性负荷差异化配比系数,构建了电-热-冷多元 IDR 模型。通过引入差异化配比系数,可以实现不同类型柔性负荷的灵活调节,从而进一步提升需求侧柔性资源的调节潜力。多元 IDR 模型具体表示为

$$P_n^{\mathrm{IDR}}(t)=P_n^{0}(t)+\Delta P_n^{\mathrm{sh}}(t)+\Delta P_n^{\mathrm{cu}}(t)+\Delta P_n^{\mathrm{al}}(t) \tag{13}$$

$$\begin{cases}\sum_{t=1}^{T}\left|\Delta P_n^{\mathrm{sh}}(t)\right|=x_n^{\mathrm{sh}}\Delta P_n^{\mathrm{IDR}}\\ \sum_{t=1}^{T}\left|\Delta P_n^{\mathrm{cu}}(t)\right|=y_n^{\mathrm{cu}}\Delta P_n^{\mathrm{IDR}}\\ \sum_{t=1}^{T}\left|\Delta P_n^{\mathrm{al}}(t)\right|=z_n^{\mathrm{al}}\Delta P_n^{\mathrm{IDR}}\\ x_n^{\mathrm{sh}}+y_n^{\mathrm{cu}}+z_n^{\mathrm{al}}=1\end{cases} \tag{14}$$

式中:$n\in\{E,H,C\}$,E,H,C 分别表示电、热、冷负荷;$P_n^{IDR}(t)$为负荷 n 在 IDR 后的功率;$P_n^{0}(t)$为负荷 n 在 IDR 前的功率;$\Delta P_n^{sh}(t)$,$\Delta P_n^{cu}(t)$,$\Delta P_n^{al}(t)$分别为 IDR 后可转移、可削减、可替代负荷的变化量;T 为调度周期;ΔP_n^{IDR} 为柔性负荷 n 的总需求量;x_n^{sh},y_n^{cu},z_n^{al}分别为转移型、削减型和替代型负荷在柔性总负荷中的配比,通过改变配比数值可以改变不同类型柔性负荷的比例,从而实现负荷的灵活调节。

3.1 转移型负荷

转移型负荷在优化周期里的用能可以从某一时间段转移至另一时间段,且在此过程中,负荷用能需求的总量始终维持恒定。例如,电热水器、洗衣机等用电设备,园区工业生产中的某些制热环节以及大型商场的制冷系统,它们的使用时间并非严格固定,用户可以根据激励机制或自身时间安排调整用能时段,但不影响基本用能需求。转移型负荷建模如下:

$$\begin{cases}\Delta P_n^{sh}(t)=\varphi_{n,1}^{sh}(t)P_{n,1}^{sh}(t)-\varphi_{n,2}^{sh}(t)P_{n,2}^{sh}(t)\\ \varphi_{n,1}^{sh}(t)+\varphi_{n,2}^{sh}(t)\leqslant 1\\ \sum_{t=1}^{T}P_{n,1}^{sh}(t)=\sum_{t=1}^{T}P_{n,2}^{sh}(t)\\ \Delta P_{n,\min}^{sh}\leqslant\Delta P_n^{sh}(t)\leqslant\Delta P_{n,\max}^{sh}\end{cases}\tag{15}$$

式中:$P_{n,1}^{sh}(t)$,$P_{n,2}^{sh}(t)$分别为转进、转出负荷;$\varphi_{n,1}^{sh}(t)$,$\varphi_{n,2}^{sh}(t)$分别为转移二进制变量;$\Delta P_{n,\max}^{sh}$,$\Delta P_{n,\min}^{sh}$分别为转移型负荷变化量的最大值、最小值。

负荷转移越多,用户用能体验的舒适性就越差,这会导致用户参与响应市场的意愿下降。因此,在保证用户基本用能需求的基础上,本文引入阶梯型补偿机制,以激励用户在一定范围内积极参与转移响应。PIES 的转移响应补偿成本为

$$f_{sh}=\frac{1}{2}\sum_{t=1}^{T}\sum_{n}\left[\alpha_n^{sh}\left|\Delta P_n^{sh}(t)\right|\right]\tag{16}$$

$$\alpha_n^{sh}=\begin{cases}\alpha_{n,1}^{sh},\ 0\leqslant\left|\Delta P_n^{sh}(t)\right|\leqslant\Delta P_{n,b}^{sh}\\ \alpha_{n,2}^{sh},\ \Delta P_{n,b}^{sh}<\left|\Delta P_n^{sh}(t)\right|\end{cases}\tag{17}$$

式中:f_{sh} 为转移响应补偿成本;α_n^{sh} 为转移响应补偿系数;$\Delta P_{n,b}^{sh}$为转移型负荷的阶梯划分边界。

用户参与负荷转移响应的意愿越低,则实际转移响应量就越低,补偿系数就越小;相反,用户参与负荷转移响应的意愿越高,则实际转移响应量就越高,补偿系数就越大。因此,转移响应补偿系数 $\alpha_{n,1}^{sh}$,$\alpha_{n,2}^{sh}$应满足 $\alpha_{n,1}^{sh}<\alpha_{n,2}^{sh}$。

3.2 削减型负荷

削减型负荷是指在保障用户用能舒适度的前提下,为优化系统的运行经济性而削减或中断的部分用能需求。例如,照明、非关键用电设备、对温度要求不严的大型仓库的供暖以及非高峰时段商业建筑中的空调区域等,通过减少设备运行时间或降低运行功率,可以提升系统的运行经济性。削减型负荷建模如下:

$$\begin{cases}\left|\Delta P_n^{cu}(t)\right|\leqslant 0\\ \Delta P_{n,\min}^{cu}\leqslant\left|\Delta P_n^{cu}(t)\right|\leqslant\Delta P_{n,\max}^{cu}\end{cases}\tag{18}$$

式中:$\Delta P_{n,\max}^{cu}$,$\Delta P_{n,\min}^{cu}$分别为削减型负荷变化量的最大值、最小值。

由于削减型负荷和转移型负荷同样会影响用户用能的满意度,因此,本文引入阶梯型补偿机制,对参与削减响应的用户也给予一定的经济补偿,以激励用户积极参与削减响应。PIES 的削减响应补偿成本可以表示为

$$f_{cu}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n}\left[\alpha_n^{cu}\left|\Delta P_n^{cu}(t)\right|\right]\tag{19}$$

$$\alpha_n^{sh}=\begin{cases}\alpha_{n,1}^{cu},\ 0\leqslant\left|\Delta P_n^{cu}(t)\right|\leqslant\Delta P_{n,b}^{cu}\\ \alpha_{n,2}^{cu},\ \Delta P_{n,b}^{cu}<\left|\Delta P_n^{cu}(t)\right|\end{cases}\tag{20}$$

式中:f_{cu} 为削减响应补偿成本;α_n^{cu} 为削减响应补偿系数;$\Delta P_{n,b}^{cu}$为削减型负荷的阶梯划分边界。

与转移响应补偿系数类似,削减响应补偿系数 $\alpha_{n,1}^{cu}$,$\alpha_{n,2}^{cu}$也应满足 $\alpha_{n,1}^{cu}<\alpha_{n,2}^{cu}$。

3.3 替代型负荷

需求侧的用户根据不同时段能源价格的差异改变用能形式,以等价异质能源来满足当前的能

源需求,用户的用能需求不会发生变化,且系统不会产生额外的响应补偿。例如,根据电能、燃气价格的高低,用户的供热需求可以由燃气锅炉或电热锅炉满足。替代型负荷建模如下:

$$\begin{cases}\Delta P_n^{\mathrm{al}}(t)=\varphi_{n,1}^{\mathrm{al}}(t)P_{n,1}^{\mathrm{al}}(t)-\varphi_{n,2}^{\mathrm{al}}(t)P_{n,2}^{\mathrm{al}}(t)\\ \varphi_{n,1}^{\mathrm{al}}(t)+\varphi_{n,2}^{\mathrm{al}}(t)\leqslant 1\\ \Delta P_{\mathrm{E}}^{\mathrm{al}}(t)+\Delta P_{\mathrm{H}}^{\mathrm{al}}(t)+\Delta P_{\mathrm{C}}^{\mathrm{al}}(t)=0\\ \Delta P_{n,\min}^{\mathrm{al}}\leqslant\left|\Delta P_n^{\mathrm{al}}(t)\right|\leqslant\Delta P_{n,\max}^{\mathrm{al}}\end{cases}\tag{21}$$

式中:$P_{n,1}^{\mathrm{al}}(t)$,$P_{n,2}^{\mathrm{al}}(t)$分别为替代、被替代负荷;$\varphi_{n,1}^{\mathrm{al}}(t)$,$\varphi_{n,2}^{\mathrm{al}}(t)$为替代二进制变量;$\Delta P_{n,\max}^{\mathrm{al}}$,$\Delta P_{n,\min}^{\mathrm{al}}$分别为替代型负荷 n 变化量的最大值、最小值。

3.4　综合用能满意度

IDR 策略的本质是用户与系统的双向互动,忽略用户用能体验将陷入“技术可行但用户拒绝”的困境。因此,本文引入综合用能满意度指标,衡量用户对电、热、冷 3 种能源的用能满意程度,以量化用户的用能舒适性。综合用能满意度具体表示为

$$R=1-\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{n}\left|P_n^{\mathrm{IDR}}(t)-P_n^{0}(t)\right|-\sum_{t=1}^{T}\sum_{n}\left|\Delta P_n^{\mathrm{al}}(t)\right|}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{n}\left|P_n^{0}(t)\right|}\tag{22}$$

4　PIES 优化模型

4.1　目标函数

本文构建的 PIES 调度模型以日运行成本 f_{PIES} 最小为优化目标,包括购能成本 f_{E}、弃风成本 f_{W}、运维成本 f_{Y}、IDR 成本 f_{IDR} 和碳交易成本 f_{C},具体表示为

$$f_{\mathrm{PIES}}=(f_{\mathrm{E}}+f_{\mathrm{W}}+f_{\mathrm{Y}}+f_{\mathrm{IDR}}+f_{\mathrm{C}})\tag{23}$$

①购能成本 f_{E}

$$f_{\mathrm{E}}=\sum_{t=1}^{T}\left[\lambda_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)-\lambda_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)P_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)+\lambda_{\mathrm{b}}^{\mathrm{g}}(t)P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{g}}(t)\right]\tag{24}$$

式中:$P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)$,$P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{g}}(t)$分别为购电量、购气量;$P_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)$为售电量;$\lambda_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)$,$\lambda_{\mathrm{b}}^{\mathrm{g}}(t)$分别为购电、购气单价;$\lambda_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)$为售电单价。

②弃风成本 f_{W}

$$f_{\mathrm{W}}=\sum_{t=1}^{T}\left[\zeta_{\mathrm{WT}}\left|P_{\mathrm{WT}}^{\max}(t)-P_{\mathrm{WT}}(t)\right|\right]\tag{25}$$

式中:$P_{\mathrm{WT}}(t)$为 WT 的输出功率;$P_{\mathrm{WT}}^{\max}(t)$为 WT 输出功率的上限;$\zeta_{\mathrm{WT}}$为单位弃风惩罚因子。

③运维成本 f_{Y}

$$f_{\mathrm{Y}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i}\left[\beta_i P_i(t)\right]\tag{26}$$

式中:$P_i(t)$为设备 i 的输出功率;β_i 为设备 i 的单位运维成本;设备 i 包括 WT,GT,OFC,EB,WHB,GB,AC,EC,BST 和 TST。

④IDR 成本 f_{IDR}

$$f_{\mathrm{IDR}}=f_{\mathrm{sh}}+f_{\mathrm{cu}}\tag{27}$$

⑤碳交易成本 f_{C}

目前国内多地(如北京、深圳等)正在试行碳交易市场,将碳排放权作为可交易的商品。《2030 年前碳达峰行动方案》提出“推动产业园区能源系统整体优化”,明确要求“探索园区级碳核算与交易机制”。PIES 作为能源高效清洁利用的重要载体,具备较为完善的能源监测和计量体系,能够准确核算碳排放量,为参与碳交易提供了数据支撑。因此,本文将碳交易成本纳入到 PIES 的优化目标中,旨在通过市场化机制推动 PIES 低碳转型,助力“双碳”目标实现。本文 PIES 的碳排放来源于外部电网、GT 和 GB,碳交易成本可表示为

$$f_{\mathrm{C}}=\varepsilon(Q_{\mathrm{R}}-Q_{\mathrm{N}})\tag{28}$$

式中:Q_{R},Q_{N} 分别为 PIES 的实际、额定碳排放量,具体计算详见文献[10];ε 为单位碳价。

4.2　约束条件

①风机出力约束

$$0\leqslant P_{\mathrm{WT}}(t)\leqslant P_{\mathrm{WT}}^{\max}(t)\tag{29}$$

②购能、售能约束

$$\begin{cases}0\leqslant P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)\leqslant\varphi_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e},\max}\\ 0\leqslant P_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)\leqslant\varphi_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)P_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e},\max}\\ 0\leqslant P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{g}}(t)\leqslant P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e},\max}\\ \varphi_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)+\varphi_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)\leqslant 1\end{cases}\tag{30}$$

式中:$P_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e},\max}$,$P_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e},\max}$,$P_{\mathrm{g}}^{\mathrm{e},\max}$分别为购电、售电、购气功率的上限;$\varphi_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}(t)$,$\varphi_{\mathrm{s}}^{\mathrm{e}}(t)$为二进制变量,表示 PIES

在任一时刻无法同时进行购电/售电。

③设备运行约束

$$\begin{cases} P_m^{\min} \leqslant P_m(t) \leqslant P_m^{\max} \\ \Delta P_m^{\text{down}} \leqslant P_m(t)-P_m(t-1) \leqslant \Delta P_m^{\text{up}} \end{cases} \tag{31}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_k^{\text{c}}(t) \leqslant \varphi_k^{\text{c}}(t) P_k^{\text{c,max}} \\ 0 \leqslant P_k^{\text{d}}(t) \leqslant \varphi_k^{\text{d}}(t) P_k^{\text{d,max}} \\ \varphi_k^{\text{c}}(t)+\varphi_k^{\text{d}}(t) \leqslant 1 \\ S_k^{\min} \leqslant S_k(t) \leqslant S_k^{\max} \\ S_k(t)=(1-\sigma_k)S_k(t-1)+P_k^{\text{c}}(t)\eta_k^{\text{c}}-P_k^{\text{d}}(t)/\eta_k^{\text{d}} \end{cases} \tag{32}$$

式中:$P_m(t)$为供能设备 m 的输出功率;$P_m^{\min}$,$P_m^{\max}$分别为设备 m 输出功率的下限、上限;ΔP_m^{down},ΔP_m^{up}分别为设备 m 爬坡率的下限、上限;供能设备 m 包括 WT,EB,OFC,GT,WHB,EC,GB 和 AC;$P_k^{\text{c,max}}$,$P_k^{\text{d,max}}$分别为储能设备储、放能功率的最大值;$\varphi_k^{\text{c}}(t)$,$\varphi_k^{\text{d}}(t)$为二进制变量,当 $\varphi_k^{\text{c}}(t)=1$ 时,表示储能设备储能,当 $\varphi_k^{\text{d}}(t)=1$ 时,表示储能设备放能,且储、放能不能同时进行;储能设备 k 包括 BST 和 TST;$S_k(t)$为储能设备 k 的容量;$S_k^{\max}$,$S_k^{\min}$分别为储能设备 k 储能容量的上限、下限;σ_k为储能设备 k 的自损系数;$P_k^{\text{c}}(t)$,$P_k^{\text{d}}(t)$分别为储能设备 k 储、放能的功率;η_k^{c},η_k^{d}分别为储能设备 k 储、放能的效率。

④功率平衡约束

$$P_{\text{E}}^{\text{IDR}}(t)=P_{\text{WT}}(t)+P_{\text{b}}^{\text{e}}(t)+P_{\text{CHP}}^{\text{e}}(t)+P_{\text{BST}}^{\text{d}}(t)-P_{\text{BST}}^{\text{c}}(t)-P_{\text{EC}}^{\text{e}}(t)-P_{\text{s}}^{\text{e}}(t) \tag{33}$$

$$P_{\text{H}}^{\text{IDR}}(t)=P_{\text{GB}}^{\text{h}}(t)+P_{\text{CHP}}^{\text{h}}(t)+P_{\text{TST}}^{\text{d}}(t)-P_{\text{TST}}^{\text{c}}(t)-P_{\text{AC}}^{\text{h}}(t) \tag{34}$$

$$P_{\text{C}}^{\text{IDR}}(t)=P_{\text{EC}}^{\text{l}}(t)+P_{\text{AC}}^{\text{l}}(t) \tag{35}$$

$$P_{\text{b}}^{\text{g}}(t)=P_{\text{GT}}^{\text{g}}(t)+P_{\text{GB}}^{\text{g}}(t) \tag{36}$$

式中:$P_{\text{EC}}^{\text{e}}(t)$为 EC 消耗的电能;$P_{\text{GB}}^{\text{h}}(t)$为 GB 输出的热能;$P_{\text{AC}}^{\text{h}}(t)$为 AC 消耗的热能;$P_{\text{EC}}^{\text{l}}(t)$,$P_{\text{AC}}^{\text{l}}(t)$分别为 EC 和 AC 输出的冷能;$P_{\text{GB}}^{\text{g}}(t)$为 GB 消耗的气能。

⑤用能满意度约束

如果用能满意度较低,表明系统对用户的用能干扰较大,这会极大地影响用户的正常用能体验,可能导致用户退出 IDR 策略,这不仅会削弱系统的调节能力,还会降低系统运行的经济灵活性。因此,为了保障用户的基本用能体验和优化系统运行,用能满意度须满足如下条件:

$$R \geqslant 0.90 \tag{37}$$

⑥电力网络约束

电力网络的运行约束包括有功/无功平衡、支路潮流、节点电压和相角约束,具体表示为

$$\begin{cases} P_{\text{G}}^{j}(t)+P_{\text{GT}}^{j}(t)+P_{\text{WT}}^{j}(t)+P_{\text{BST}}^{j}(t)+P_{\text{OFC}}^{j}(t)- \\ P_{\text{EC}}^{j}(t)-P_{\text{EB}}^{j}(t)+\sum_{(i,j)\in a(j)} P_{\text{EL}}^{ij}(t)-\sum_{(j,k)\in b(j)} P_{\text{EL}}^{jk}(t)=\tilde{P}_{\text{EL}}^{j}(t) \\ Q_{\text{G}}^{j}(t)+Q_{\text{GT}}^{j}(t)+Q_{\text{WT}}^{j}(t)+Q_{\text{BST}}^{j}(t)+Q_{\text{OFC}}^{j}(t)- \\ Q_{\text{EC}}^{j}(t)-Q_{\text{EB}}^{j}(t)+\sum_{(i,j)\in a(j)} Q_{\text{EL}}^{ij}(t)-\sum_{(j,k)\in b(j)} Q_{\text{EL}}^{jk}(t)=\tilde{Q}_{\text{EL}}^{j}(t) \\ P_{ij}^{\min} \leqslant P_{ij}(t) \leqslant P_{ij}^{\max} \\ Q_{ij}^{\min} \leqslant Q_{ij}(t) \leqslant Q_{ij}^{\max} \\ V_j^{\min} \leqslant V_j(t) \leqslant V_j^{\max} \\ \theta_j^{\min} \leqslant \theta_j(t) \leqslant \theta_j^{\max} \end{cases} \tag{38}$$

式中:$a(j)$,$b(j)$分别为以节点 j 为始、终端的线路集;$P_{\text{EL}}^{ij}(t)$,$Q_{\text{EL}}^{ij}(t)$分别为节点 i 流入节点 j 的有功和无功;$P_{\text{EL}}^{jk}(t)$,$Q_{\text{EL}}^{jk}(t)$分别为节点 j 流入节点 k 的有功和无功;$\tilde{P}_{\text{EL}}^{j}(t)$,$\tilde{Q}_{\text{EL}}^{j}(t)$分别为节点 j 处的原始有功和无功;$P_{ij}^{\max}$,$P_{ij}^{\min}$分别为(i,j)支路可以承受的有功上、下限;$Q_{ij}^{\max}$,$Q_{ij}^{\min}$分别为(i,j)支路可以承受的无功上、下限;$V_j^{\max}$,$V_j^{\min}$分别为节点 j 的电压幅值上、下限;$\theta_j^{\max}$,$\theta_j^{\min}$分别为节点 j 的电压相角上、下限。

⑦天然气网约束

在稳态工况下,天然气网遵循以下基本假设:气流呈单向传输特性,忽略管存动态及其他次要

因素影响。天然气网的运行约束体系主要包括:基于节点质量守恒方程的流量平衡条件;压缩机组增压特性与运行边界约束;以气体动力学方程描述的管道传输特性;节点压力幅值限制条件;针对被动型管道建立的压差-流量耦合模型。以上约束方程具体参考文献[21]。

4.3　模型求解

本文建立的考虑供能、需求双侧灵活响应的PIES优化调度模型为混合整数非线性规划模型,直接求解比较困难。因此,基于文献[22]提出的分段线性逼近策略对模型非线性项实施线性转换,可将原非线性规划模型重构为混合整数线性规划模型,最终通过MATLAB平台调用CPLEX求解器实现高效求解。

5　算例分析

5.1　基础数据

本文基于IEEE-69节点电力系统和比利时20节点天然气系统构建了一个PIES进行仿真分析,系统拓扑如图2所示[23]。其中,在36,52,63和67节点处安装4个风电机组,在39和51节点处安装2个蓄电池。天然气系统中包含2个加压站、4个储气罐和2个气源点,具体参数参考文献[21]。多元负荷和风机出力参考文献[11],预测曲线如图3所示;外部能源价格如表1所示;CHP中设备的变工况特性如图4所示;表2为主要设备参数;储能系统参数参考文献[19];单位碳价为0.28元/kg;弃风惩罚因子为0.2元/(kW·h);转移型负荷的响应补偿系数 $\alpha^{sh}_{E,1}$,$\alpha^{sh}_{H/C,1}$,$\alpha^{sh}_{E,2}$,$\alpha^{sh}_{H/C,2}$ 分别为0.08,0.05,0.12,0.08元/(kW·h);削减型负荷的响应补偿系数 $\alpha^{cu}_{E,1}$,$\alpha^{cu}_{H/C,1}$,$\alpha^{cu}_{E,2}$,$\alpha^{cu}_{H/C,2}$ 分别为0.06,0.03,0.10,0.05元/(kW·h);转移型负荷划分边界 $\Delta P^{sh}_{E,b}$,$\Delta P^{sh}_{H,b}$,$\Delta P^{sh}_{C,b}$ 分别为160,112,80 kW;削减型负荷划分边界 $\Delta P^{cu}_{E,b}$,$\Delta P^{cu}_{H,b}$,$\Delta P^{cu}_{C,b}$ 分别为68,56,36 kW;热、电、冷负荷的柔性负荷均占负荷总量的10%;不同负荷的转移型、削减型和替代型负荷的占比 $x^{sh}:y^{cu}:z^{al}$ 均为1:1:1。

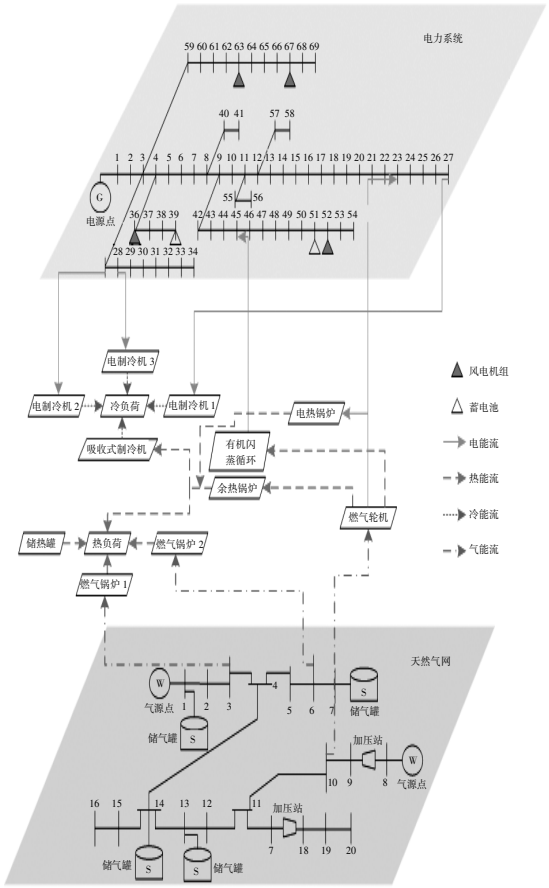


图2　PIES拓扑图

Fig.2 PIES topology diagram

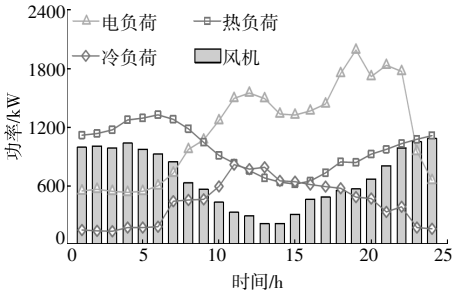


图3　负荷和风机出力的预测曲线

Fig.3 Predictive curves of loads and wind turbine

表1　外部能源价格

Table 1 External energy prices　　元/(kW·h)

时段	购电价格	售电价格	天然气价格
峰(11:00-14:00,18:00-22:00)	1.24		
平(07:00-10:00,15:00-17:00)	0.78	0.35	0.35
谷(23:00-06:00)	0.36		

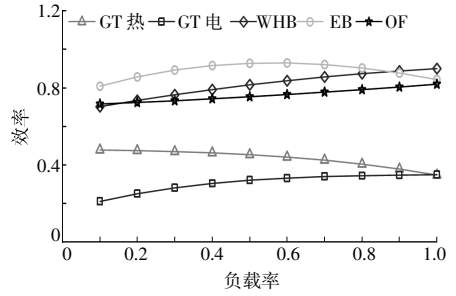


图4　CHP的变工况特性

Fig.4 Variable operating condition characteristics of CHP

表 2 主要供能设备参数

Table 2 Parameters of the main energy supply equipment

设备	数量	额定效率	修正效率拟合系数	额定容量/kW	运维单价/(元·kW^{-1}·h^{-1})	爬坡率/%
GT	1	0.36(电) 0.48(热)	$a_{GT}^{e,3}$=0.193 0,$a_{GT}^{e,2}$=−0.548 6,$a_{GT}^{e,1}$=0.543 1, $a_{GT}^{e,0}$=0.162 5,$a_{GT}^{h,3}$=−0.101 3,$a_{GT}^{h,2}$=−0.009 0, $a_{GT}^{h,1}$=−0.021 9,$a_{GT}^{h,0}$=0.480 0	1 200	0.043	25
OFC	1	0.82	a_{OFC}^{2}=0.039 9,a_{OFC}^{1}=0.071 1,a_{OFC}^{0}=0.709 0	700	0.058	25
EB	1	0.94	a_{EB}^{3}=0.110 8,a_{EB}^{2}=−0.696 2, a_{EB}^{1}=0.680 6,a_{EB}^{0}=0.748 2	700	0.029	25
WHB	1	0.91	a_{WHB}^{2}=−0.127 1,a_{WHB}^{1}=0.358 5,a_{WHB}^{0}=0.668 6	600	0.022	25
GB	2	0.86		400	0.035	25
EC	3	3.00		200	0.026	25
AC	1	1.49		650	0.023	25

5.2 基于 OFC 和 EB 的供给侧响应分析

为分析基于 OFC 和 EB 的解耦 CHP 机组对 PIES 调度的影响,设置以下 2 种情景进行对比分析。情景 1:传统定工况 CHP 机组,未考虑 OFC 和 EB;情景 2:改进定工况 CHP 机组,综合考虑 OFC 和 EB。2 种情景下 PIES 的优化结果如表 3 所示。

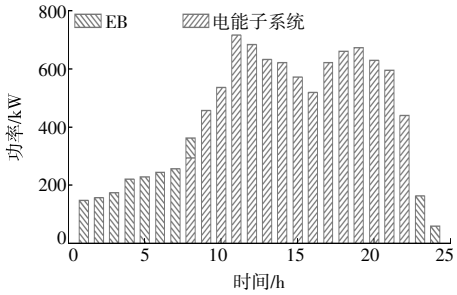
表 3 不同情景下 PIES 优化结果对比

Table 3 Comparison of PIES optimization results for different scenarios

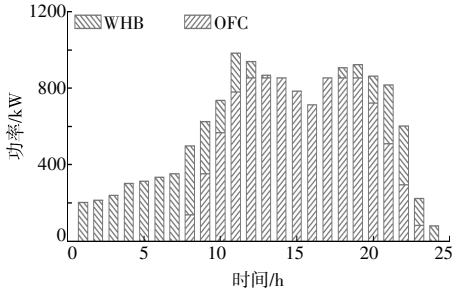
情景	f_E/元	f_W/元	f_Y/元	f_C/元	Q_R/kg	f_{PIES}/元
1	24 153.85	622.36	2 375.62	876.19	17 714.88	28 028.02
2	17 489.63	117.79	2 695.28	300.49	10 305.70	20 603.19

由表 3 数据可知,情景 2 具有更优的综合效益。在日间用电高峰时段,系统通过 OFC 装置将热电机组的冗余热能转化为电能,不仅减少了购电成本,而且降低了系统碳排放量。在夜间用电低谷时段,系统通过 EB 将机组电能转化为热能,为风电上网提供更大的空间。虽然在情景 2 中增加了 2 种设备,使得运维成本有所增加,但被其他用能成本的降低所抵消,最终情景 2 的总成本、弃风成本、碳排放量分别减少了 26.49%,81.07%,41.82%,这表明引入 OFC 和 EB 的供给侧响应模型可以有效提升风电并网水平,在优化 PIES 经济运行水平、促进低碳协同方面具有显著优势。

图 5 为情景 2 中 GT 的热电输出能流图。由图 5 可知,通过 OFC 和 EB 的协同作用,解耦了传统 CHP“以热定电”和“以电定热”的刚性约束,



(a)GT 的电能流向



(b)GT 的热能流向

图 5 GT 的输出功率

Fig.5 Power output of the GT

实现了机组电能、热能的灵活供应。在 23:00–07:00,系统呈现高风电渗透率与高热力负荷需求特征,此时系统通过 EB 实现热电解耦运行,GT 产生的电能全部输入 EB 进行热转化,其发电余热经 WHB 回收后并入供热网络,这既满足了热负荷需求,又避免了传统 CHP 因强制发电导致的弃风问题。在 09:00–22:00 高电价时段,系统呈现高电力、低热力负荷需求特征,此阶段系统通过 OFC

拓展 GT 余热利用路径,将 GT 余热主要导向 OFC 进行发电,且 GT 产电完全输入到供电网络,实现机组以供电为主导的运行策略，从而降低系统对外部电网的依赖。这表明在情景 2 中,基于 OFC 和 EB 的供给侧响应策略可以打破传统机组热电的刚性耦合,有效提升 PIES 供能的灵活性。

5.3　CHP 设备变工况运行分析

为分析设备变工况对 PIES 调度的影响,增设情景 3,与情景 2 进行对比分析。情景 3:在情景 2 的基础上，考虑 GT,OFC,EB 与 WHB 变工况运行。2 种情景下 PIES 的优化结果如表 4 所示。图 6 为情景 3 中 CHP 各设备的变工况效率曲线。

表 4　不同情景的 PIES 优化结果对比

Table 4 Comparison of PIES optimization results for different scenarios

情景	f_E/元	f_W/元	f_Y/元	f_C/元	Q_R/kg	f_{PIES}/元
2	17 489.63	117.79	2 695.28	300.49	10 305.70	20 603.19
3	18 728.96	117.79	2 759.41	464.37	11 024.65	22 070.53

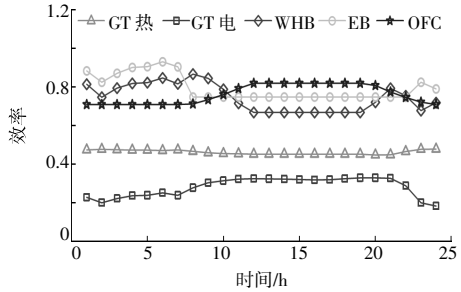


图 6　CHP 设备的动态效率曲线

Fig.6 Dynamic efficiency curves for CHP equipment

根据表 4 与图 6 的数据分析可知，与情景 2 相比,情景 3 的总成本增加了 7.12%,碳排放量提高了 6.98%，这表明 CHP 变工况运行对 PIES 的经济低碳性产生了一定程度的影响。这是因为情景 2 为固定工况,CHP 各设备均基于最佳的额定效率运行，机组的能源利用效率处于理论峰值状态，这使得机组最大程度地利用能源，从而使 PIES 具有更优的经济性和更低的碳排放。从图 6 还可以看出,GT,OFC,EB 和 WHB 在变工况下的效率随时间呈现动态实时变化，且大部分时段低于额定效率值。这一效率衰减特性导致设备须要消耗更多的能源以维持相同出力，从而使购能成本增加了 7.09%。此外,由于变工况下设备出力波动加剧，使得系统的运维与碳交易成本也同步上升了 2.38%,54.54%。尽管情景 3 的经济低碳性劣于情景 2，但其通过动态效率建模真实反映了 CHP 实际运行特性,避免了假设额定工况下的解耦效果过于理想化。这说明 CHP 变工况模型有效提升了调度模型的精度，为实际系统优化提供了更可靠的决策依据。

5.4　供需响应协调优化分析

为对比分析验证供需响应协调优化的有效性,增设情景 4:在情景 3 的基础上,考虑 IDR 构建供需双响应协调优化模型。2 种情景的优化对比结果如表 5 所示。

表 5　有无 IDR 策略的优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results with and without IDR strategy

情景	f_E/元	f_W/元	f_Y/元	f_{IDR}/元	f_C/元	Q_R/kg	f_{PIES}/元
3	18 728.96	117.79	2 759.41	0	464.37	11 024.65	22 070.53
4	17 008.13	0	2 480.17	102.88	407.30	9949.71	19 998.48

情景 4 中功率平衡优化结果如图 7 所示,负荷优化结果如图 8 所示。结合图 7,8 分析可知,在调度周期内,PIES 通过灵活调整设备出力和负荷用能,运行效益得到进一步优化。在日间高电价时段,电负荷需求明显高于冷、热负荷需求。鉴于该时段电价与燃气价格的差异较大,供能端在 OFC 协助下,CHP 机组优先将 GT 余热进行热电转换,以满足电负荷需求，将热负荷供给任务转由能效更优的 GB 承担。同时,在需求侧,通过替代、削减和转移进行多元负荷柔性响应,PIES 不仅平滑了负荷用能曲线，提高了系统运行的可靠性与稳定性,还实现了对系统碳排放强度的有效控制。在夜间低电价时段，系统热负荷需求明显高于冷、电负荷需求，通过对此时段内的热负荷实施削减、转移和电/热替代策略,并将日间部分电负荷转移至此时段，不仅可以提高风电的消纳水平,还可以降低能源成本,优化 PIES 的经济运行。结合表 5 数据可以看出，情景 4 的风电出力被完全消纳,运行成本、碳排放量比情景 3 分别减少了

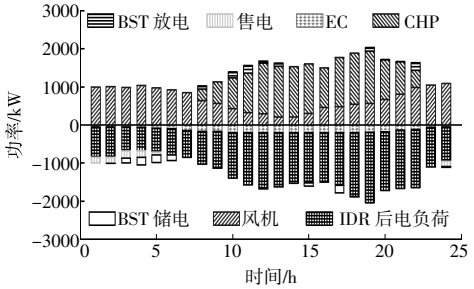
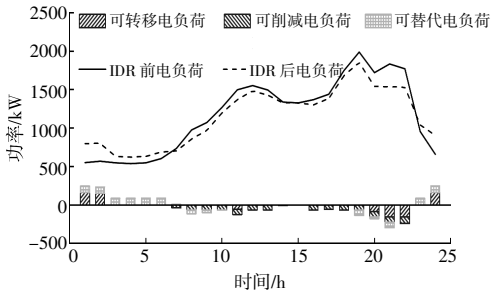
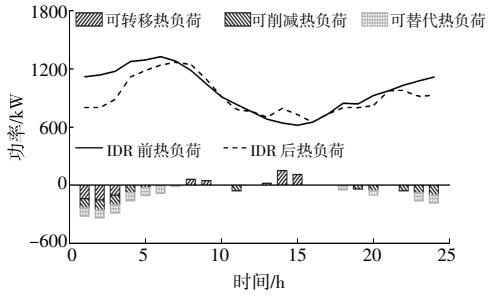


图 7　电功率平衡

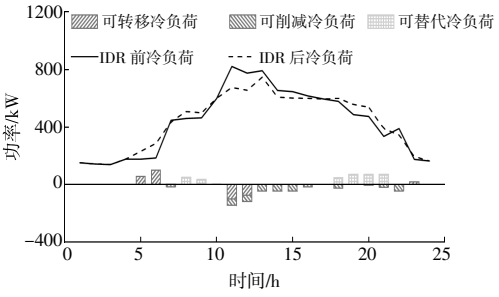
Fig.7 Electric power balance



(a)电负荷



(b)热负荷



(c)冷负荷

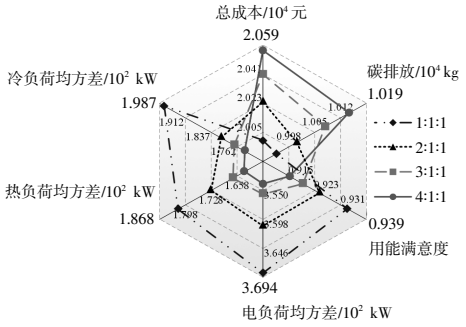
图 8 负荷优化结果

Fig.8 Load optimization results

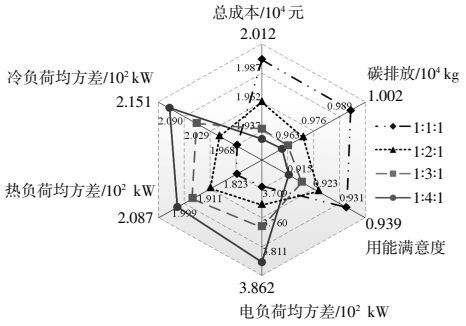
9.39%,9.75%,电、热、冷负荷峰谷差比情景 3 分别降低了 223.00,88.07,73.67 kW,这表明本文所提的供需双侧响应协调优化模型不仅促进了 PIES 的“移峰填谷”,而且可以有效提升风电入网消纳,进一步优化 PIES 的运行低碳性与经济性。

5.5 柔性负荷灵敏度分析

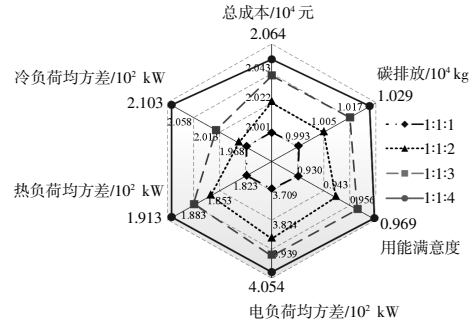
为了分析转移型、替代型和削减型柔性负荷占比变化对 PIES 运行优化的影响,以情景 4 为基础设置情景 5、情景 6 和情景 7。情景 5:转移、削减、替代型负荷的占比按 1:1:1,2:1:1,3:1:1 和 4:1:1 进行调整;情景 6:转移、削减、替代型负荷的占比按 1:1:1,1:2:1,1:3:1 和 1:4:1 进行调整;情景 7:转移、削减、替代型负荷的占比按 1:1:1,1:1:2,1:1:3 和 1:1:4 进行调整。3 种情景下 PIES 的负荷均方差、总运行成本、碳排放量和用能满意度优化结果如图 9 所示。



(a)情景 5



(b)情景 6



(c)情景 7

图 9 柔性负荷灵敏度分析

Fig.9 Flexible load sensitivity analysis

由图 9(a)可以看出,随着转移型负荷的占比逐渐增加,PIES 的负荷均方差、用能满意度逐渐降低,而总成本、碳排放量逐渐上升。负荷均方差降低是因为转移型负荷将高峰时段的负荷用能转移至低谷时段,对均方差作用的本质是“削峰”和“填谷”,而削减型负荷作用的本质只是“削峰”。从图 8 可以看出,可替代电负荷虽然能“削峰填谷”,但其作用小于转移型负荷,可替代热、冷负荷都只能单向调节,这说明转移型负荷在降低系统均方差、提高稳定性方面表现更出色。总成本和碳排放量上升是因为减少了削减型负荷的占比,减少削减型负荷实质上扩大了系统的总负荷需求,从而提高了系统的总成本和碳排放量。用能满意度下

降是因为减少了替代型负荷的占比，替代型负荷只是转换用能形式,对用户的用能体验影响较小,但会降低用户的用能满意度。图 9(b),(c)的灵敏度分析与图 9(a)类似,此处不再细述。

综上分析，提高转移型负荷的占比有利于降低系统均方差，提高削减型负荷的占比有利于优化系统的低碳、经济运行,提高替代型负荷的占比有利于提升用户的用能满意度。因此,决策人员在制定 PIES 的调度计划时,应根据实际情况适时调整转移型、削减型和替代型柔性负荷的占比,以平衡系统的稳定性、经济低碳性和用能满意度。

6　结论

本文提出一种考虑供需灵活响应的 PIES 调度策略，通过供需柔性资源的协调优化，实现 PIES 灵活、稳定、低碳与经济运行。主要结论如下。

①通过引入 EB 和 OFC 打破 CHP 机组的电、热刚性耦合，既能显著提升 PIES 的供能灵活性，又能在促进风电上网消纳的同时,有效降低 PIES 的运行总成本与碳排放量。

②与定工况模型相比,CHP 变工况模型通过动态效率建模，真实反映了 CHP 实际运行特性，避免了额定工况下解耦效果过于理想化，不仅有效提升了调度模型的精度，而且为实际系统优化提供了更可靠的决策依据。

③由情景 3 和情景 4 的对比结果可以看出，供需协调优化模型可以充分激发 PIES 供需柔性资源的响应潜力，不仅促进了 PIES 的“削峰填谷”，而且进一步优化了 PIES 的运行低碳性与经济性。

④转移型负荷有利于降低系统负荷均方差，削减型负荷有利于优化系统的低碳经济运行,替代型负荷有利于提升用户的用能满意度。因此,在实际运行中，调度人员应根据实际情况适当调整转移型、削减型和替代型柔性负荷的占比,以平衡系统的稳定性、经济性、低碳性和用能满意度。

参考文献:

[1] 沈运帷,徐凯,林顺富,等.考虑广义储能参与的多园区综合能源系统低碳优化运行策略[J].电力自动化设备,2024,44(11):41-51.

[2] 崔世庭,高遥,常伟,等.阶梯碳交易配电网综合优化模型[J].中国测试,2025,51(3): 139-147.

[3] 黎观海,朱建全,赵文猛,等.考虑灵活性不足风险的园区综合能源系统优化调度[J].高电压技术,2024,50(2):704-713.

[4] 韩旭,林俊军,郭筱涵. 多元储能风光燃储系统设备优化研究[J].中国测试,2024,50(10):23-34.

[5] 李颖杰,庞宁,黄安子,等.计及分布式储能响应的虚拟电厂优化调度模型研究[J].电子器件,2022,45(5):1230-1234.

[6] 任炬光,张力,金立,等.考虑可再生能源消纳的建筑综合能源系统日前经济调度模型[J].工程科学与技术,2023,55(2):160-170.

[7] 刘禹彤,程孟增,张明理,等.基于多重混合博弈的云储能市场优化运行策略[J].沈阳工业大学学报,2024,46(3):270-276.

[8] 田莉,王志凌.基于风光气互补的园区综合能源系统性能分析及优化调控[J].中国测试,2024,50(1):128-137.

[9] Kang L G,Wang J Z,Yuan X X,et al.Research on energy management of integrated energy system coupled with organic Rankine cycle and power to gas [J].Energy Conversion and Management,2023,287:117117.

[10] 李艺丰,黄曲粲,闫朝阳,等.基于奖惩机制碳交易的综合能源系统供需双响应低碳调控[J].可再生能源,2024,42(8):1111-1119.

[11] 吴永孝,肖辉,曾林俊,等.考虑供需双边响应的综合能源系统优化调度[J].电力建设,2024,45(10):13-23.

[12] 陈兴龙,曹喜民,陈洁,等.绿证-碳交易机制下热电灵活响应的园区综合能源系统优化调度[J].中国电力,2024,57(6):110-120.

[13] Chen X L,Cao X M,Huang Q F,et al.Optimized operation of park integrated energy system with source-load flexible response based on comprehensive evaluation index [J].Energy Engineering,2024,121 (11):3437-3460.

[14] 吴苏日姑嘎,马运先,杨泽一,等.非共沸混合工质有机闪蒸循环热力学分析与优化 [J]. 中国电机工程学报,2022,42(20):7546-7554.

[15] 林细君,林强,赵创业,等.基于条件风险价值理论的综合能源系统优化调度[J].沈阳工业大学学报,2023,45(2): 187-192.

[16] Tan Z F,Yang S B,Lin H Y,et al.Multi-scenario operation optimization model for park integrated energy system based on multi-energy demand response [J]. Sustainable Cities and Society,2020,53:101973.

[17] 晋旭东,孙磊,丁明,等.考虑用户响应不确定性的园区综合能源系统分布鲁棒低碳调度[J].电力系统自动化,2023,47(16):10-21.

[18] Yi T,Ren W J.Low carbon economy scheduling of

integrated energy system considering the mutual response of supply and demand [J].Sustainable Energy,Grids and Networks,2024,38:101279.
[19] 孙亮,原瑞彤,张程,等.考虑电热需求响应的综合能源系统低碳优化运行 [J]. 可再生能源,2023,41(6):836-844.
[20] 杨泽一,吴苏日姑嘎,马运先,等.混合工质有机闪蒸循环热力学分析 [J]. 工程热物理学报,2022,43(7):1768-1776.
[21] 卫志农,张思德,孙国强,等.基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J].电力系统自动化,2016,40(15):9-16.
[22] 王强钢,吴雪翠,杨龙杰,等.考虑设备变工况特性和灵活性供需匹配的园区综合能源系统优化配置模型[J].电力自动化设备,2023,43(3):20-28,37.
[23] 严干贵,陈佰会,王佳琪,等.计及综合需求响应的综合能源系统主从博弈优化调度策略[J].东北电力大学学报,2024,44(4):46-55+85.

Optimal scheduling of park integrated energy system considering flexible response of supply and demand

Ma Yan[1], Hou Juan[1], Wang Fei[2], Xin Yechun[3]
(1.Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, China; 2.State Power Investment Group Henan Electric Power Co.,Ltd., Technical Information Center, Zhengzhou 450000, China; 3.Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Deepening the response potential of flexible resources can enhance the operational economy, flexibility and low-carbon nature of the park integrated energy system (PIES). For this reason, this paper proposes an optimal scheduling strategy for PIES that considers the flexible response of supply and demand. First, on the basis of analyzing the dynamic energy efficiency characteristics of the equipment, the organic flash cycle and the electric boiler are introduced to establish a supply-side flexible response model for the multimodal and variable operating conditions of the combined heat and power unit. Then, an electricity-cooling-heating multivariate demand response model with differential rationing of curtailment, substitution and transfer of flexible loads is established on the load side based on a multilevel stepped incentive compensation mechanism. Finally, the coordination optimization model for flexible response of supply and demand of PIES is constructed with the optimization objective of minimizing the daily operation cost. Simulation shows that the proposed strategy not only improves the accuracy of the dispatch model, but also achieves a multi-dimensional optimal balance of system economy and low carbon with energy supply reliability and satisfaction while promoting wind power consumption.

Keywords: park integrated energy system; flexible response of supply and demand; organic flash cycle; variable operating conditions; coordination optimization