

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.020

含有机朗肯循环的虚拟电厂能源梯级优化低碳调度策略

徐慧慧¹, 赵宇洋¹, 田云飞¹, 彭婧¹, 罗盛航², 梁宁²

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050;

2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:为进一步提升考虑烟效率的虚拟电厂调度的经济性和低碳性,提出一种考虑有机朗肯循环的虚拟电厂能源梯级优化低碳调度策略。首先,以提高热能“烟”效率为目标,研究有机朗肯循环发电机理,建立其利用低品质余热出力的数学模型;其次,研究虚拟电厂中有机朗肯循环与电转气装置的耦合机理,建立考虑阶梯式碳交易的减碳引导模型,实现虚拟电厂热能梯级利用与低碳调度相耦合;然后,建立包含热电联供机组、燃气锅炉及气负荷的碳排放权模型,明确碳排放责任;最后,在荷侧建立包含电、热、气的多元负荷综合需求响应模型,并以虚拟电厂的总成本最低为优化目标,建立虚拟电厂能源梯级优化低碳调度模型。算例仿真表明,所提调度策略能有效提高虚拟电厂的能源利用率及低碳效益。

关键词:虚拟电厂;有机朗肯循环;热能梯级利用;低碳调度;综合需求响应;阶梯式碳交易

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0208-10

0 引言

在“双碳”战略的大背景下,可再生能源在电力系统中的占比日益提高。但目前新能源无法单独承担负荷供给任务,且新能源、负荷等资源的地理位置较为分散,波动性较强,双向的不确定性使得电力系统复杂性、灵活性资源聚合难度也随之增大^[1-3]。为了将较为分散的源荷网储侧的资源有效聚合并参与电力系统的低碳调度,实现电力系统绿色发展,使用先进通信聚合技术的虚拟电厂(virtual power plant, VPP)应运而生^[4-7]。

VPP应用包括减排节能^[8-9]、资源聚汇^[10]等。在资源聚汇方面,深圳市已经开展VPP落地建设工作^[11],资源聚合量已经初具规模,为后续实现电力系统低碳、高效、经济运行提供了物质基础。在减排、经济方面,文献[12]提出基于动态碳排因子的多VPP电-碳联合优化策略,可实现VPP各部分利润的合理分配,同时兼顾低碳性;文献[13]以阶梯式碳交易为引导,考虑多类型元件的约束特性,实现VPP的低碳经济运行;文献[14]对VPP各个单元的不确定性建模,以强区间线性规划法实现VPP的经济性;文献[15]建立电网运营商和VPP的混合博弈模型,在保证经济低碳运行的同时,实现各成员的利益公平分配;文献[16]从碳角度出发,提出一种基于碳风险的VPP低碳调度策略,在实现

低碳经济的同时,促进新能源消纳。以上研究从资源配置角度对VPP进行优化,忽略了能源利用效率对VPP的优化潜力。

“烟”效率即能源的有效使用率,是评判系统低碳性、节能性的重要标准。目前我国在热电联供(combined heat and power, CHP)机组方面的能源利用率不高,仅约50%。在“烟”效率的研究上,文献[17]提出离散化“烟”流和能效评估方法,提高了“烟”效率;文献[18]考虑能量之间的品位差异,建立一种“烟”效率计算模型,合理评价综合能源系统的低碳、高效性。有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)是我国余热利用的主要技术之一,是提高余热“烟”效率的常用手段,在我国已有广泛应用。文献[19]将ORC融入二氧化碳羽流地热系统发电应用技术中,实现碳减排和可再生能源技术利用耦合;在综合能源系统方面,文献[20-21]通过在CHP机组侧加装ORC装置,回收余热锅炉中未被利用的余热进行发电,实现热能的梯级利用。但上述研究侧重于以ORC解耦传统CHP的“以热定电”模式,未对“烟”效率的提升与减碳特性之间的耦合关系进行深入分析。

负荷侧响应是解决VPP供需平衡的重要手段,以负荷侧更低的调用成本,完成VPP负荷的横、纵向转移,从而实现经济运行。文献[22]提出一种多时间尺度下考虑VPP需求响应的调度策略,实现对风光出力波动性的平抑,提高系统运行的经济性;文献[23]提出一种考虑需求响应优先级的调度策略,区分不同负荷的响应优先级,提升VPP对可再

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52167010); 国家电网有限公司科技项目(52273023010C, W24FZ2730049)

生能源的消纳能力, 实现经济运行。但上述文献均为单一的电负荷需求响应, 未考虑 VPP 中热、气负荷的响应潜力。文献[24]从用户冷热舒适用能角度出发, 建立热负荷的精细化响应模型, 提高热负荷的响应能力; 文献[25]将气负荷分为可转移、可削减、可替代 3 类, 建立气负荷响应模型。上述研究只考虑一种或两种负荷之间的响应, 并未对电、热、气 3 类负荷联合响应后的低碳潜力展开研究。

针对上述问题, 文中提出一种考虑 ORC 的 VPP 能源梯级优化的低碳调度策略。首先, 基于 ORC 发电机理将 CHP 机组未利用的余热转化为电能, 并与富余风电一起供给电转气(power to gas, P2G)装置, 实现能源梯级利用与低碳运行的耦合; 其次, P2G 消耗风能及产生的温室气体合成天然气, 供应系统内耗气设备, 加强电、热、气能源的耦合, 进一步释放碳交易对减排的引导潜力, 发挥不同能源之间相互促进的优势, 减小购能成本及碳交易成本; 同时, 对比不同碳交易基价下 VPP 的碳成本和碳消耗量, 分析 VPP 对碳市场信息发生变化时的敏感度; 然后, 建立负荷侧的电、热、气联合响应模型, 以阶梯式碳交易为约束、VPP 总运行成本最小为目标函数进行优化; 最后, 建立“烟”效率计算模型并分析“烟”效率与低碳运行的正相关耦合特性, 实现 VPP 的低碳优化调度。

1 含 ORC 的 VPP 能源梯级优化低碳调度策略

VPP 是联系“源荷网储”各部分的桥梁, 是实现新型电力系统供需平衡、低碳运行的重要手段之一。文中 VPP 内部源侧有 CHP 机组(含 P2G、ORC 等装置)、风电、燃气锅炉(gas boiler, GB), 荷侧有气负荷, 储侧有电、热、气 3 类储能元件。VPP 源侧外部连接天然气网和上级电网, 荷侧外部连接电、热负荷。含 ORC 的 VPP 能源梯级优化低碳调度策略分为两部分, 一是利用 ORC 将低品质余热转化为电能; 二是将 ORC 产生的电功率供给 VPP 的 P2G, 然后以综合需求响应(integrated demand response, IDR)实现 VPP 供需平衡。VPP 能量循环如图 1 所示。

1.1 含 ORC 的 VPP 的 CHP 出力模型

ORC 是一种利用余热进行发电的技术, 通常利用 CHP 机组中的低品质余热进行发电, 可实现热能的回收再利用, ORC 发电原理见文献[26]。

CHP 系统由燃气轮机(gas turbine, GT)和余热锅炉(waste heat boiler, WHB)组成, 加装 ORC 装置后, 可利用低品质余热进行发电。

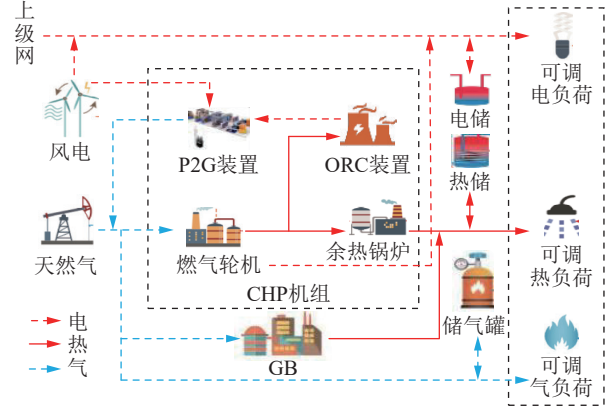


图 1 VPP 能量循环

Fig.1 VPP energy cycle

GT 机组模型为:

$$\begin{cases} P_{e,GT}(t) = \eta_e P_{g,GT}(t) \\ P_{h,GT}(t) = \eta_{h,GT} P_{g,GT}(t) \\ P_{g,GT}^{\min} \leq P_{g,GT}(t) \leq P_{g,GT}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{e,GT}(t)$ 、 $P_{h,GT}(t)$ 分别为 t 时段 GT 产生的电、热功率; η_e 、 $\eta_{h,GT}$ 分别为 GT 的气电、气热转化效率; $P_{g,GT}(t)$ 为 t 时段 GT 所需要的天然气功率; $P_{g,GT}^{\max}$ 、 $P_{g,GT}^{\min}$ 分别为 GT 的天然气功率上、下限。

含 ORC 的 WHB 出力模型为:

$$\begin{cases} P_{h,GT}(t) = P_{ORC,h}(t) + P_{WHB,h}(t) \\ P_{ORC,e}(t) = \eta_{ORC} P_{ORC,h}(t) \\ P_{h,WHB}(t) = (1 - \eta_{WHB}) P_{WHB,h}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{ORC,h}(t)$ 、 $P_{WHB,h}(t)$ 分别为 t 时段 ORC、WHB 的热功率; $P_{ORC,e}(t)$ 为 t 时段 ORC 产生的电功率; η_{ORC} 为 ORC 效率; η_{WHB} 为热损失效率; $P_{h,WHB}(t)$ 为 t 时段 WHB 供热功率。

“烟”效率是评价能量与功之间的转化程度的重要指标, 即输出功与输入功之比, 是文中评价 VPP 能源利用效率与低碳运行耦合度的重要指标。CHP 机组的“烟”效率计算模型为:

$$\eta_{ex}(t) = \frac{P_{h,GT}(t) + P_{ORC,e}(t)}{P_{g,GT}(t)} \quad (3)$$

式中: $\eta_{ex}(t)$ 为 CHP 机组在 t 时段的“烟”效率。

GB 出力模型为:

$$\begin{cases} P_{h,GB}(t) = \eta_{GB} P_{g,GB}(t) \\ P_{g,GB}^{\min} \leq P_{g,GB}(t) \leq P_{g,GB}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{h,GB}(t)$ 为 t 时段 GB 产生的热功率; $P_{g,GB}(t)$ 为 t 时段 GB 所需气功率; η_{GB} 为 GB 热转化效率; $P_{g,GB}^{\max}$ 、 $P_{g,GB}^{\min}$ 分别为 GB 的天然气功率上、下限。

P2G 模型为:

$$P_{P2G,g}(t) = \eta_{P2G} P_{P2G,e}(t) \quad (5)$$

$$P_{P2G,e}(t) = P_{ORC,e}(t) + P_{a,w}(t) \quad (6)$$

$$m_{CO_2}(t) = \eta_{CO_2} P_{P2G,e}(t) \quad (7)$$

式中: $P_{P2G,g}(t)$ 为 t 时段系统输出的天然气功率; η_{P2G} 为 P2G 的转化效率; $P_{P2G,e}(t)$ 为 t 时段 P2G 所需电功率; $P_{a,w}(t)$ 为 t 时段弃风功率; $m_{CO_2}(t)$ 为 t 时段合成天然气消耗的温室气体质量; η_{CO_2} 为温室气体的转化效率。

1.2 碳排放权交易模型

碳交易(carbon emission trading, CET)的施行以配额的方式进行,各行业以收到的免费配额为基准,超出免费的部分则需要购买碳排放权。采取国内的无偿分配方式^[27],设置外购电量来自新能源机组,碳排放权初始配额模型为:

$$D_{VPP} = D_{GB} + D_{GT} + D_{g,load} \quad (8)$$

$$\begin{cases} D_{GB} = \chi_h \sum_{t=1}^T P_{h,GB}(t) \\ D_{GT} = \chi_h \sum_{t=1}^T (\chi_{e-h} P_{e,GT}(t) + P_{h,GT}(t)) \\ D_{g,load} = \chi_g \sum_{t=1}^T P_{g,load}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_{VPP} 、 D_{GB} 、 D_{GT} 、 $D_{g,load}$ 分别为 VPP、GB、GT、气负荷的碳配额; χ_h 、 χ_g 分别为单位热功率、单位气负荷的碳配额; χ_{e-h} 为热电转化系数; $P_{g,load}(t)$ 为 t 时段气负荷; T 为调度周期,文中取 24 h。

实际碳排放模型为:

$$D_{VPP,a} = D_{g,load,a} + D_{IE,a} - D_{P2G,a} \quad (10)$$

$$\begin{cases} D_{g,load,a} = \sum_{t=1}^T \xi P_{g,load}(t) \\ D_{IE,a} = \sum_{t=1}^T (x_2 + y_2 P_{IE,a}(t) + z_2 P_{IE,a}^2(t)) \\ P_{IE,a}(t) = P_{e,GT}(t) + P_{h,GT}(t) + P_{h,GB}(t) \\ D_{P2G,a} = \sum_{t=1}^T \varpi P_{P2G,g}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $D_{VPP,a}$ 、 $D_{g,load,a}$ 、 $D_{IE,a}$ 分别为 VPP、气负荷、GT 及 GB 整体的实际碳排; $D_{P2G,a}$ 为 P2G 装置吸收的碳排; $P_{IE,a}(t)$ 为 t 时段 CHP 的等效输出功率; x_2 、 y_2 、 z_2 为燃烧天然气的碳排系数; ξ 、 ϖ 分别为气负荷的等效碳排参数、P2G 的吸收参数。

2 VPP 的 IDR 建模

2.1 负荷侧需求响应模型

IDR 可增加多能耦合的 VPP 的供需平衡灵活性^[28],提升 VPP 的减碳潜力,在负荷侧充分挖掘电、热、气负荷的调节潜力,可达到降低碳排放量、减少运行成本的目的。

由于响应特性相似,所以文中对电、热、气 3 类负荷进行统一建模,响应模型为:

$$P_{k,load}(t) = P_{k,load}^{0,s}(t) + P_{k,load}^{0,c}(t) + P_{k,load}^{0,p}(t) \quad (12)$$

式中: $P_{k,load}(t)$ 为第 k 类负荷在 t 时段的值,文中 k 为 3; $P_{k,load}^{0,s}(t)$ 为 t 时段第 k 类负荷的刚性负荷; $P_{k,load}^{0,c}(t)$ 为 t 时段第 k 类负荷的可削减负荷; $P_{k,load}^{0,p}(t)$ 为 t 时段第 k 类负荷的可转移负荷。可削减、可转移负荷的具体模型详见文献^[29]。

2.2 储能模型

储能具有可充放的双向特性。热、气储能均可同时充放电,故文中将热、气储能进行统一建模,而不具备同时充放特性的电储能在文中单独建模。

热、气储能模型为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES,n}^C(t) \leq P_{ES,n}^{\max} \\ 0 \leq P_{ES,n}^D(t) \leq P_{ES,n}^{\max} \\ P_{ES,n}(t) = \eta_{ES,n}^C P_{ES,n}^C(t) - P_{ES,n}^D(t) / \eta_{ES,n}^D \\ S_n(t) = S_n(t-1) + P_{ES,n}(t) / P_{ES,n}^{\text{cap}} \\ S_n^{\min} \leq S_n(t) \leq S_n^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{ES,n}^C(t)$ 、 $P_{ES,n}^D(t)$ 分别为 t 时段第 n 种储能的充、放电功率,文中 n 取 2; $P_{ES,n}^{\max}$ 、 $\eta_{ES,n}^C$ 、 $\eta_{ES,n}^D$ 分别为第 n 种储能最大充放电功率、充电效率、放电效率; $P_{ES,n}(t)$ 为第 n 种储能能在 t 时段的输出功率; $S_n(t)$ 为 t 时段第 n 种储能的容量; S_n^{\max} 、 S_n^{\min} 分别为第 n 种储能的容量; $P_{ES,n}^{\text{cap}}$ 为第 n 种储能的额定容量。

电储能模型为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES,e}^C(t) \leq u_{ES,e}^C(t) P_{ES,e}^{\max} \\ 0 \leq P_{ES,e}^D(t) \leq u_{ES,e}^D(t) P_{ES,e}^{\max} \\ P_{ES,e}(t) = \eta_{ES,e}^C P_{ES,e}^C(t) - P_{ES,e}^D(t) / \eta_{ES,e}^D \\ S_e(t) = S_e(t-1) + P_{ES,e}(t) / P_{ES,e}^{\text{cap}} \\ u_{ES,e}^C(t) + u_{ES,e}^D(t) = 1 \\ S_e^{\min} \leq S_e(t) \leq S_e^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{ES,e}^C(t)$ 、 $P_{ES,e}^D(t)$ 分别为 t 时段电储能的充、放电功率; $u_{ES,e}^C(t)$ 、 $u_{ES,e}^D(t)$ 分别为表征 t 时段电储能充、放电状态的 0-1 变量; $P_{ES,e}^{\max}$ 为电储能的容量; $\eta_{ES,e}^C$ 、 $\eta_{ES,e}^D$ 分别为电储能充、放电效率; $P_{ES,e}(t)$ 为 t 时段电储能的输出功率; $S_e(t)$ 为电储能在 t 时段的容量; S_e^{\min} 、 S_e^{\max} 分别为电储能的最小、最大容量; $P_{ES,e}^{\text{cap}}$ 为电储能的额定容量。

3 含 ORC 的 VPP 能源梯级优化的低碳调度模型

3.1 目标函数

为评估碳交易的低碳引导潜力以及热能利用效率与低碳运行的耦合度,文中综合考虑 VPP 的购

能成本、弃风成本、碳交易成本、IDR 补偿成本,以 VPP 总成本最小为优化目标。

$$\min F = \min(f_{\text{buy}} + f_{\text{AD}} + f_{\text{CO}_2} + f_{\text{IDR}}) \quad (15)$$

式中: F 为 VPP 的总成本; f_{buy} 、 f_{AD} 、 f_{CO_2} 、 f_{IDR} 分别为购能成本、弃风成本、碳交易成本、IDR 补偿成本。

(1) 购能成本 f_{buy} 。购能成本包括向上级电网的购电成本和上级气网的购气成本。

$$f_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T (\alpha_e P_{e,\text{buy}}(t) + \alpha_g P_{g,\text{buy}}(t)) \quad (16)$$

式中: α_e 、 α_g 分别为单位购电、购气成本; $P_{e,\text{buy}}(t)$ 、 $P_{g,\text{buy}}(t)$ 分别为 t 时段的购电、购气功率。

(2) 弃风成本 f_{AD} 。因风电具有反负荷特性,称负荷无法消纳的那部分风电为弃风电量,弃风惩罚成本模型如下:

$$\begin{cases} f_{\text{AD}} = \delta_{\text{AD}} \sum_{t=1}^T P_{\text{AD}}(t) \\ P_{\text{AD}}(t) = P_{\text{wt}}(t) - P_{\text{w,d}}(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中: δ_{AD} 为单位弃风惩罚成本; $P_{\text{AD}}(t)$ 为 t 时段弃风功率; $P_{\text{wt}}(t)$ 、 $P_{\text{w,d}}(t)$ 分别为 t 时段风电出力、风电消纳功率。

(3) 碳交易成本 f_{CO_2} 。奖惩阶梯式碳交易成本如下:

$$f_{\text{CO}_2} = \begin{cases} -[\lambda(1+2\alpha)(D_a - 2L) + (2+\alpha)\lambda L] & -3L \leq D_a < -2L \\ -[\lambda(1+\alpha)(D_a - L) + \lambda L] & -2L \leq D_a < -L \\ -\lambda D_a & -L \leq D_a < 0 \\ \lambda D_a & 0 \leq D_a < L \\ \lambda(1+\alpha)(D_a - L) + \lambda L & L \leq D_a < 2L \\ \lambda(1+2\alpha)(D_a - 2L) + (2+\alpha)\lambda L & 2L \leq D_a \leq 3L \end{cases} \quad (18)$$

$$D_a = D_{\text{VPP,a}} - D_{\text{VPP}} \quad (19)$$

式中: λ 为碳交易基价; L 为碳排区间长度; α 为奖惩价格涨幅; D_a 为参与碳交易的碳排放量。

(4) IDR 补偿成本 f_{IDR} 。

$$f_{\text{IDR}} = \sum_{k=1}^3 \sum_{t=1}^T (\delta_p |\Delta P_{k,\text{load}}^p(t)| + \delta_c |\Delta P_{k,\text{load}}^c(t)|) \quad (20)$$

式中: δ_p 、 δ_c 分别为可转移、可削减负荷参与响应的补偿系数; $\Delta P_{k,\text{load}}^p(t)$ 、 $\Delta P_{k,\text{load}}^c(t)$ 分别为 t 时段参与 IDR 的第 k 类负荷的可转移、可削减负荷量。

3.2 约束条件

(1) 电功率平衡。

$$\begin{cases} P_{e,\text{buy}}(t) + P_{e,\text{GT}}(t) + P_{\text{ORC},e}(t) + P_{\text{w,d}}(t) = \\ P_{\text{P2G},e}(t) + P_{e,\text{load}}(t) + P_{\text{ES},e}(t) \\ 0 \leq P_{e,\text{buy}}(t) \leq P_{e,\text{buy}}^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{e,\text{load}}(t)$ 为 t 时段电负荷; $P_{e,\text{buy}}^{\max}$ 为最大购电量。

(2) 热功率平衡。

$$P_{h,\text{WHB}}(t) + P_{h,\text{GT}}(t) = P_{h,\text{load}}(t) + P_{\text{ES},h}(t) \quad (22)$$

式中: $P_{h,\text{load}}(t)$ 为 t 时段热负荷; $P_{\text{ES},h}(t)$ 为 t 时段热储能输出功率。

(3) 气功率平衡。

$$\begin{cases} P_{g,\text{buy}}(t) + P_{\text{P2G},g}(t) = P_{g,\text{load}}(t) + P_{\text{ES},g}(t) + \\ P_{g,\text{GT}}(t) + P_{g,\text{GB}}(t) \\ 0 \leq P_{g,\text{buy}}(t) \leq P_{g,\text{buy}}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{ES},g}(t)$ 为 t 时段气储能功率; $P_{g,\text{buy}}^{\max}$ 为最大购气量。

(4) 风电出力约束。

$$0 \leq P_{\text{w,d}}(t) \leq P_{\text{w,d}}^{\max} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{w,d}}^{\max}$ 为风电最大消纳量。

4 算例分析

4.1 基础数据

文中设置的 VPP 源侧有 CHP 机组、风电,选取的负荷、风电数据来自文献[21],弃风惩罚因子为 0.1;碳配额参数 χ_h 、 χ_g 分别为 0.385、0.180, χ_{e-h} 为 5;碳交易参数中,碳交易基价取 0.25 元/kg,奖惩价格涨幅均为 25%,区间长度取 2 000 kg;CHP 机组、ORC 装置参数和各类储能参数分别见表 1、表 2。文中采用 MATLAB 2018b 软件,并使用 Gurobi 优化求解器进行求解。初始综合负荷、风电预测功率如图 2 所示。

表 1 设备参数
Table 1 Equipment parameters

设备	容量/kW	转换效率/%	爬坡约束/%
P2G	500	60	20
GT	1 000	22(气转电)、 72(气转热)	20
ORC	600	80	20
WHB	600	80	20
GB	800	80	20

表 2 储能参数
Table 2 Energy storage parameters

类型	容量/kW	下限/%	上限/%	爬坡约束/%
电储能	450	10	90	20
储热罐	500	10	90	20
储气罐	300	10	90	20

为验证所提 VPP 能源梯级优化的低碳调度模型的有效性,设置 4 个仿真案例进行对比分析。

案例 1: 未计及 ORC, VPP 负荷侧以 IDR 进行优化;

案例 2: 在案例 1 基础上,计及 ORC 用于解耦“以热定电”模式,即 ORC 所发出电能直接供电

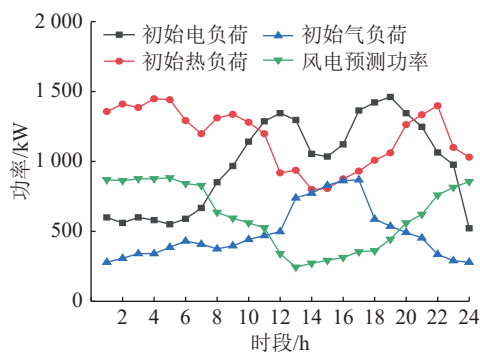


图2 初始数据
Fig.2 Initial data

负荷, VPP 负荷侧以 IDR 进行优化;

案例 3: 计及 ORC 用于“烟”效率与低碳调度耦合, VPP 负荷侧以热需求响应进行优化;

案例 4: 计及 ORC 用于“烟”效率与低碳调度耦合, VPP 负荷侧以 IDR 进行优化。

4.2 案例 1

图 3—图 5 分别为案例 1 下 VPP 电、热、气功率平衡图, 图 6 为案例 1 下 VPP 碳消耗量。可见, 未计及 ORC 时, 供给 P2G 的只有 GT 电功率、弃风功率, P2G 消耗的温室气体量有限, 消耗量为 1 852.3 kg, 碳交易成本和购能成本分别占总成本的 36.7% 和 61.7%。

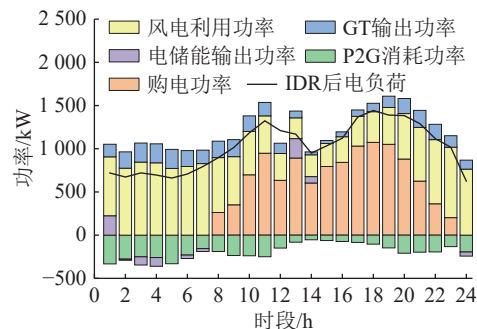


图3 不含 ORC 的 VPP 电功率平衡
Fig.3 VPP electrical power balance without ORC

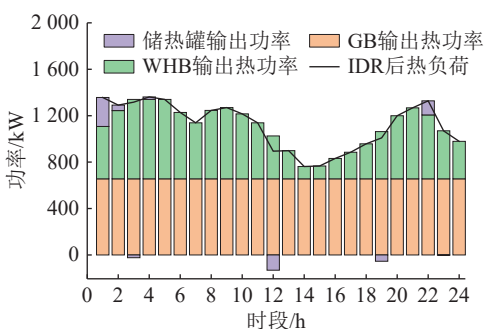


图4 不含 ORC 的 VPP 热功率平衡
Fig.4 VPP thermal power balance without ORC

4.3 案例 2

图 7—图 9 分别为案例 2 下 VPP 电、热、气功

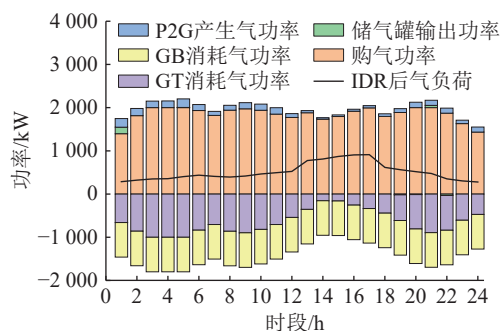


图5 不含 ORC 的 VPP 气功率平衡
Fig.5 VPP gas power balance without ORC

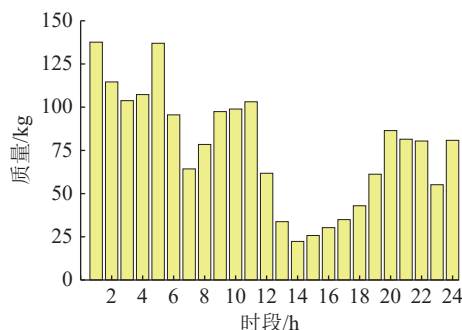


图6 不含 ORC 的 VPP 碳消耗量
Fig.6 VPP carbon consumption without ORC

率平衡图, 图 10 为案例 2 下 VPP 碳消耗量。可见, 计及 ORC 并直接供应给负荷用于解耦“以热定电”模式时, 调度日碳消耗量约为 2 398.7 kg, 碳交易成本降低约 2.3%, 总成本下降约 5.9%。

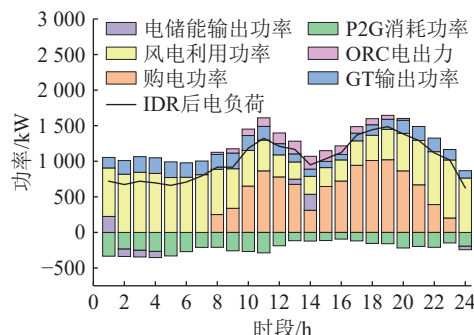


图7 含 ORC 的 VPP 电功率平衡(案例 2)
Fig.7 VPP electrical power balance with ORC (case 2)

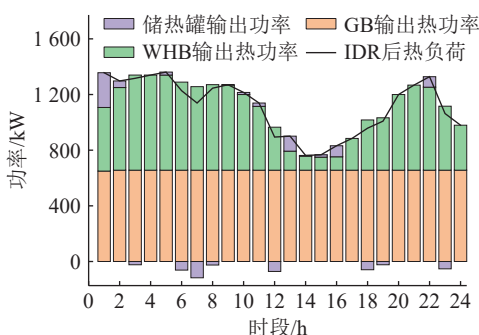


图8 含 ORC 的 VPP 热功率平衡(案例 2)
Fig.8 VPP thermal power balance with ORC (case 2)

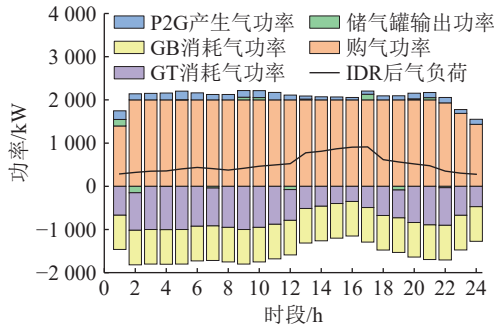


图 9 含 ORC 的 VPP 气功率平衡(案例 2)

Fig.9 VPP gas power balance with ORC (case 2)

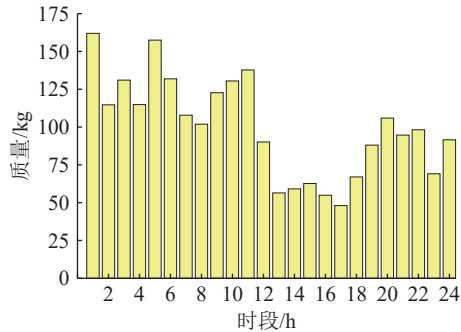


图 10 含 ORC 的 VPP 碳消耗量(案例 2)

Fig.10 VPP carbon consumption with ORC (case 2)

4.4 案例 3

图 11—图 13 分别为案例 3 下 VPP 电、热、气功率平衡图，图 14 为案例 3 下 VPP 碳消耗量。可见，计及 ORC 并以热需求响应实现供需平衡时，总成本、购能成本、碳交易成本分别为 35 181.9 元、20 756.7 元、14 355.4 元，调度日的温室气体消耗总量为 3 328.6 kg。

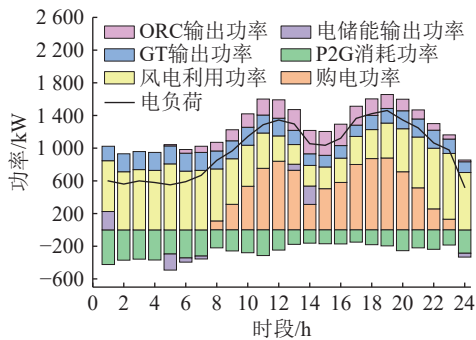


图 11 含热响应的 VPP 电功率平衡

Fig.11 VPP electrical power balance with thermal response

4.5 案例 4

图 15—图 17 分别为案例 4 下 VPP 电、热、气功率平衡图，图 18 为案例 4 下 VPP 碳消耗量。可见，考虑 ORC 并以 IDR 实现供需平衡时，CHP 中的低品质热能得到了有效利用，ORC 与 P2G 耦合后，购能成本减小约 10.7%，调度日碳消耗总量为 3 646.8 kg，

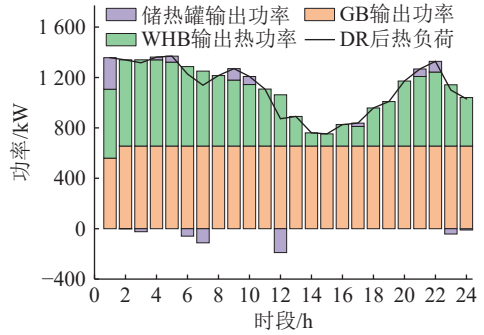


图 12 含热响应的 VPP 热功率平衡

Fig.12 VPP thermal power balance with thermal response

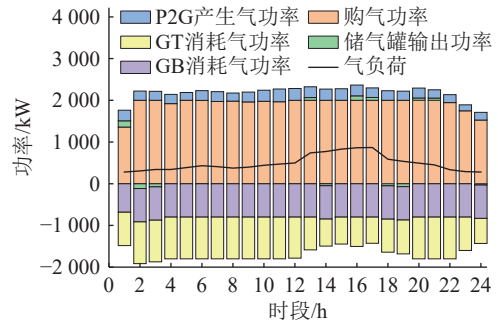


图 13 含热响应的 VPP 气功率平衡

Fig.13 VPP gas power balance with thermal response

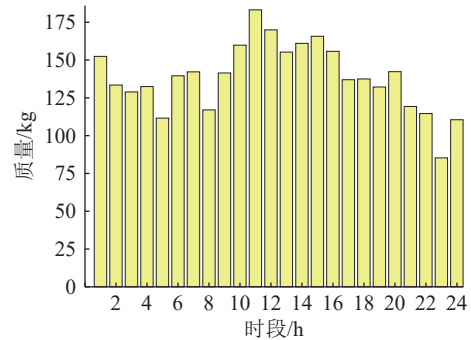


图 14 含热响应的 VPP 碳消耗量

Fig.14 VPP carbon consumption with thermal response

而 CHP“焗”效率与合成天然气的温室气体消耗量呈正相关。

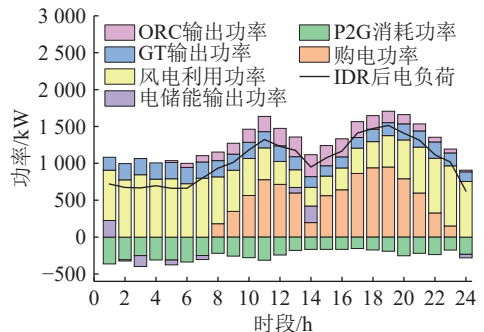


图 15 含 ORC 的 VPP 电功率平衡(案例 4)

Fig.15 VPP electrical power balance with ORC (case 4)

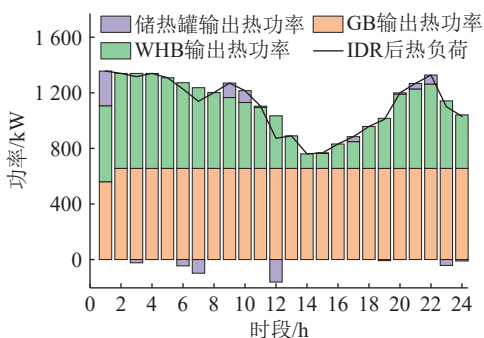


图 16 含 ORC 的 VPP 热功率平衡(案例 4)

Fig.16 VPP thermal power balance with ORC (case 4)

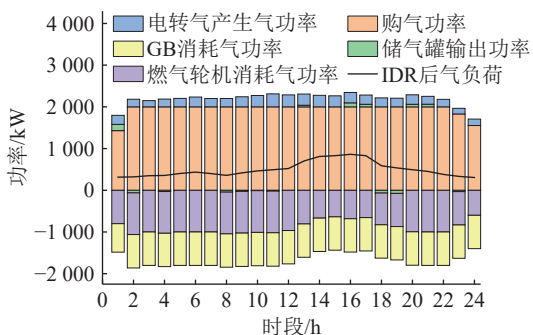


图 17 含 ORC 的 VPP 气功率平衡(案例 4)

Fig.17 VPP gas power balance with ORC (case 4)

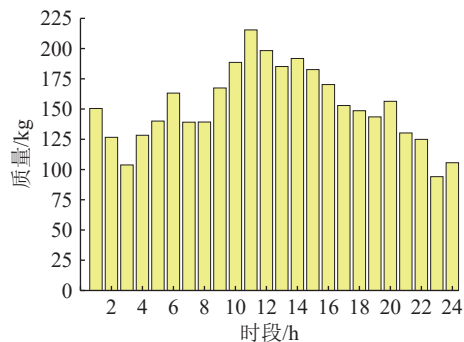


图 18 含 ORC 的 VPP 碳消耗量(案例 4)

Fig.18 VPP carbon consumption with ORC (case 4)

4.6 案例对比分析

在成本、环境效益方面,案例 1 不计及 ORC,系统总成本、碳交易成本最高;案例 2 计及 ORC,CHP 的“以热定电”模式得到解耦,在提高“焓”效率的同时,CHP 发电量增加,购电成本减小,调度日的碳消耗量相比案例 1 有所增加,为 2 398.7 kg;而案例 3 将 ORC 用于实现“焓”效率与低碳调度耦合,但仅以热需求响应实现供需平衡时,调度日的温室气体消耗量为 3 328.6 kg;案例 4 以电、热、气 IDR 实现供需平衡时,虽然总成本、购能成本略高于案例 3,但温室气体消耗量相较于案例 3 有所增加,温室气体总消耗量为 3 646.8 kg,碳成本也较小,环境效益优于案例 3, IDR 的低碳潜力高于单一需求响应。

在能效利用率方面, VPP 的“焓”效率如图 19

所示。案例 1 未利用 ORC 进行发电,所以其热能“焓”效率最低;案例 2 将 ORC 用于解耦“以热定电”,其与环境效益关联程度不高,热能“焓”效率也较小,调度日温室气体的消耗量也较小;而案例 3、4 则是将“焓”效率与低碳运行相耦合,在碳交易的引导下,调度日温室气体的消耗量均大于案例 2,“焓”效率的大小与环境效益呈正向的相关性。

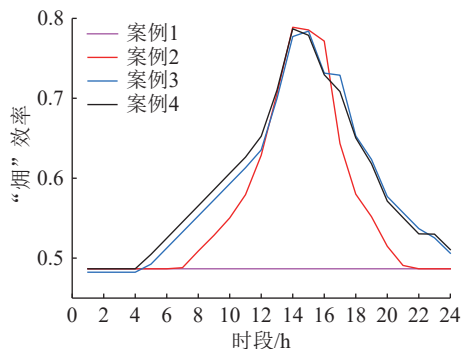


图 19 CHP“焓”效率

Fig.19 Exergy efficiency of CHP

各案例成本、温室气体消耗具体情况见表 3。

表 3 案例运行结果

Table 3 Operation results of cases

案例	总成本/元	购能成本/元	碳交易成本/元	弃风成本	IDR补偿成本/元	碳消耗量/kg
1	39 595.6	24 438.9	14 530.2	0	626.5	1 852.3
2	37 381.4	22 556.3	14 201.5	0	623.6	2 398.7
3	35 181.9	20 756.7	14 355.4	0	69.8	3 328.6
4	35 821.8	20 952.3	14 177.5	0	692.0	3 646.8

4.7 碳交易灵敏度对比分析

各案例中 VPP 对碳交易的灵敏度分析具体见表 4—表 7。在不同的碳交易基价下, VPP 对碳交易的灵敏度不同,由仿真结果可知,各案例在碳交易基价上升的趋势下,碳交易成本升高,但碳消耗有所下降,与碳交易耦合度越深,碳消耗量减少的就越多。

表 4 案例 1 碳交易灵敏度分析

Table 4 Carbon trading sensitivity analysis of case 1

碳交易基价/(元·kg ⁻¹)	总成本/元	碳交易成本/元	碳消耗量/kg
0.25	39 595.6	14 530.2	1 852.3
0.30	42 490.4	17 348.5	1 839.1
0.35	4 581.2	20 228.9	1 835.5

表 5 案例 2 碳交易灵敏度分析

Table 5 Carbon trading sensitivity analysis of case 2

碳交易基价/(元·kg ⁻¹)	总成本/元	碳交易成本/元	碳消耗量/kg
0.25	40 203.2	16 614.0	2 398.7
0.30	42 490.4	17 348.5	2 316.9
0.35	42 946.6	18 981.1	2 251.4

表 6 案例 3 碳交易灵敏度分析

Table 6 Carbon trading sensitivity analysis of case 3

碳交易基价/ (元·kg ⁻¹)	总成本/元	碳交易成本/元	碳消耗量/kg
0.25	35 181.9	14 355.4	3 328.6
0.30	38 052.5	17 191.3	3 303.1
0.35	40 909.7	19 910.8	3 211.0

表 7 案例 4 碳交易灵敏度分析

Table 7 Carbon trading sensitivity analysis of case 4

碳交易基价/ (元·kg ⁻¹)	总成本/元	碳交易成本/元	碳消耗量/kg
0.25	35 821.8	14 177.5	3 646.8
0.30	38 655.3	16 972.2	3 610.4
0.35	41 451.8	19 419.4	3 309.3

5 结论

文中提出考虑 ORC 的 VPP 能源梯级优化低碳调度策略, 综合分析 VPP 低碳经济、能源利用效率等特性后, 得到以下结论:

(1) 考虑碳交易后的 VPP 调度策略能加强 VPP 与碳市场关联度, 碳交易对 VPP 减排的引导潜力得到进一步释放, 促进 P2G 对温室气体的吸收, 使得 ORC 发电量增加, 碳交易成本约减少 353 元, 购能成本约减少 3 486 元, 兼顾经济效益与环境效益。

(2) 利用 ORC 把低品质余热转化为电能后, VPP 热能“焓”效率得到提高, 而 ORC 所发电能供给 P2G 后, 电、气转化所需的能耗增大, 相较于使用 ORC 解耦“以热定电”的调度策略, 温室气体的消耗量提高 1 248.1 kg, “焓”效率与环境效益呈正相关, 优化了 VPP 的低碳经济调度环境。

(3) 考虑 VPP 电、热、气能源耦合的调度策略能有效发挥能源互补优势, 在总成本大致相同的情况下, 调度日的案例 4 碳消耗量比案例 3 碳消耗量增加约 318 kg, 环境效益更明显, 即 IDR 的低碳性要高于单一需求响应的低碳性。

(4) 在不同的碳交易基价下, 碳交易对 VPP 的减碳引导能力有所不同, 设置合理的碳交易基价, 可最大化释放其对 VPP 的低碳引导潜力。

ORC 是一种利用低温余热进行发电的装置, 其循环工质和循环工况的不同会影响到转换效率。文中模型的建立和策略的实现, 为后续在不同的循环工质、工况下 ORC 对能源“焓”效率与低碳调度的耦合度的研究以及不同碳交易参数下 VPP 对碳交易灵敏度分析提供了理论支撑, 为未来 VPP 实现零碳化运行打下坚实基础。

参考文献:

- [1] 何斯强, 张俊岭, 顾宗奇, 等. 面向分布式资源聚合管控的虚拟电厂建模与优化控制综述[J]. 山东电力技术, 2024, 51(2): 11-24, 45.
HE Siqiang, ZHANG Junling, GU Zongqi, et al. Overview of virtual power plant modeling and optimization control for distributed resource aggregation and control[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(2): 11-24, 45.
- [2] 樊伟, 李旭东, 王尧, 等. 新型电力系统灵活性资源聚合两阶段调度优化模型[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 25-37.
FAN Wei, LI Xudong, WANG Yao, et al. Two-stage scheduling optimization model of flexible resource aggregation in new power system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 25-37.
- [3] 王泉, 贺伟, 吴红蕊, 等. 促进分布式光伏消纳的配电网灵活资源可行域聚合方法[J]. 供用电, 2024, 41(6): 3-11, 20.
WANG Xiao, HE Wei, WU Hongrui, et al. Aggregation method of flexible resource feasibility domain for promoting distributed photovoltaic consumption in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 3-11, 20.
- [4] 康重庆, 陈启鑫, 苏剑, 等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [5] 张冲标, 高博, 张卫康, 等. 基于面向新型配电网系统的虚拟电厂协同运行研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 46-53.
ZHANG Chongbiao, GAO Bo, ZHANG Weikang, et al. Research on cooperative operation of virtual power plants in novel distribution network system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 46-53.
- [6] 高赐威. 虚拟电厂概念模型与交易运行关键技术[J]. 供用电, 2023, 40(12): 1.
GAO Ciwei. Conceptual model of virtual power plant and key technology of transaction operation[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 1.
- [7] 高赐威. 虚拟电厂的概念思辨[J]. 供用电, 2023, 40(12): 2-6.
GAO Ciwei. Conceptual reflection on virtual power plants[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 2-6.
- [8] 李逸超, 胥栋, 徐刚, 等. 计及碳捕集和多能流的虚拟电厂多目标优化调度[J]. 浙江电力, 2023, 42(10): 34-44.
LI Yichao, XU Dong, XU Gang, et al. Multi-objective optimal scheduling of virtual power plant considering carbon capture and multi-energy flow[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(10): 34-44.
- [9] 吴垠, 牛文娟, 诸晓骏. 考虑不同场景的虚拟电厂建模与优化分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 40-45.

- WU Yin, NIU Wenjuan, ZHU Xiaojun. Modeling and optimization analysis of virtual power plant considering different scenarios[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(11): 40-45.
- [10] 宋天琦, 吕志鹏, 宋振浩, 等. 虚拟电厂规模化灵活资源聚合调控框架研究与思考[J]. *中国电力*, 2024, 57(1): 2-8.
SONG Tianqi, LV Zhipeng, SONG Zhenhao, et al. Research and thinking on the aggregation and dispatching control framework of virtual power plant's large scale flexible resources[J]. *Electric Power*, 2024, 57(1): 2-8.
- [11] 陈小慧. 加强深圳虚拟电厂技术创新[N]. *深圳商报*, 2023-03-07(A02).
CHEN Xiaohui. Strengthen the technological innovation of shenzhen's virtual power plant [N]. *Shenzhen Economic Daily*, 2023-03-07(A02).
- [12] 王磊, 徐志龙, 杨晨宇, 等. 虚拟电厂集群电-碳联合优化建模及求解方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(23): 29-40.
WANG Lei, XU Zhilong, YANG Chenyu, et al. Modeling and solving method of electricity-carbon Joint optimization for multi-virtual power plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(23): 29-40.
- [13] 苏志鹏, 王莉, 梁欣怡, 等. 考虑阶梯式碳交易及综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. *中国电力*, 2023, 56(12): 174-182.
SU Zhipeng, WANG Li, LIANG Xinyi, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering stepped carbon trading and comprehensive demand response[J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 174-182.
- [14] 李东东, 王啸林, 沈运帷, 等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 210-217, 251.
LI Dongdong, WANG Xiaolin, SHEN Yunwei, et al. Optimal scheduling strategy of virtual power plant with demand response and electricity-carbon trading considering multiple uncertainties[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 210-217, 251.
- [15] 徐慧慧, 田云飞, 赵宇洋, 等. 考虑绿证-碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度[J]. *智慧电力*, 2024, 52(3): 1-7, 16.
XU Huihui, TIAN Yunfei, ZHAO Yuyang, et al. Optimal scheduling of multiple virtual power plants mixed game considering green certificate and carbon trading[J]. *Smart Power*, 2024, 52(3): 1-7, 16.
- [16] 王秋杰, 亓浩, 谭洪, 等. 考虑碳市场风险的热电联产虚拟电厂低碳调度[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(10): 8-15.
WANG Qiujie, QI Hao, TAN Hong, et al. Low-carbon scheduling of CHP virtual power plant considering carbon market risk[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(10): 8-15.
- [17] 田立亭, 程林, 李荣, 等. 基于加权有向图的园区综合能源系统多场景能效评价方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6471-6483.
TIAN Liting, CHENG Lin, LI Rong, et al. A multi-scenario energy efficiency evaluation method for district multi-energy systems based on weighted directed graph[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6471-6483.
- [18] 韦良炜, 付昶, 王伟锋, 等. 综合能源系统能效评价方法初探[J]. *热力发电*, 2024, 53(6): 58-64.
WEI Liangwei, FU Chang, WANG Weifeng, et al. Preliminary exploration of efficiency evaluation for integrated energy system[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(6): 58-64.
- [19] 魏菊艳, 付美龙, 刘玉龙. CPGS 国内外研究现状及发电应用进展[J]. *能源与环保*, 2024, 46(2): 171-177.
WEI Juyan, FU Meilong, LIU Yulong. Current research status and development of power generation applications of CPGS at home and abroad[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2024, 46(2): 171-177.
- [20] 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.
CHEN Xinglong, CAO Ximin, CHEN Jie, et al. Optimized dispatch of park integrated energy system with thermoelectric flexible response under green certificate-carbon trading mechanism[J]. *Electric Power*, 2024, 57(6): 110-120.
- [21] 张彩玲, 王爽, 葛淑娜, 等. 计及灵活需求响应和碳-绿证交易的综合能源系统优化调度[J]. *中国电力*, 2024, 57(5): 14-25.
ZHANG Cailing, WANG Shuang, GE Shuna, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems considering flexible demand response and carbon emission-green certificate joint trading[J]. *Electric Power*, 2024, 57(5): 14-25.
- [22] 杨力帆, 周鲲, 齐增清, 等. 基于需求响应的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 10-21.
YANG Lifan, ZHOU Kun, QI Zengqing, et al. A multi-time scale optimal scheduling strategy of virtual power plants based on demand response[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 10-21.
- [23] 郝俊伟, 樊艳芳. 考虑需求响应优先级的配电终端虚拟电厂优化调度研究[J]. *可再生能源*, 2024, 42(5): 647-654.
HAO Junwei, FAN Yanfang. Research on optimal dispatching of virtual power plant of distribution terminal considering priority of demand response[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(5): 647-654.
- [24] 张靖, 李勇, 曹一家, 等. 计及需求侧管理与碳排放的综合能源系统光-储设备优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(7): 189-197.
ZHANG Jing, LI Yong, CAO Yijia, et al. Optimal configuration approach of PV-ESS for integrated energy system considering demand-side management and carbon emission[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(7): 189-197.
- [25] 张庆, 王涛, 李川. 计及柔性负荷和碳流的园区综合能源系统优化运行模型研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(6): 54-61.

- ZHANG Qing, WANG Tao, LI Chuan. Optimal operation model of park integrated energy systems considering flexible loads and carbon flows[J]. *Smart Power*, 2024, 52(6): 54-61.
- [26] 唐辉辉. 有机朗肯循环低温余热发电系统研究[J]. *机械管理开发*, 2023, 38(11): 86-87, 90.
- TANG Huihui. Research on organic Rankine cycle low temperature waste heat power generation system[J]. *Mechanical Management and Development*, 2023, 38(11): 86-87, 90.
- [27] 杨欢红, 谢明洋, 黄文焘, 等. 含废物处理的城市综合能源系统低碳经济运行策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(9): 3545-3552.
- YANG Huanhong, XIE Mingyang, HUANG Wentao, et al. Low-carbon economic operation of urban integrated energy system including waste treatment[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3545-3552.
- [28] 徐慧慧, 田云飞, 缪猛, 等. 计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. *智慧电力*, 2023, 51(8): 1-7.
- XU Huihui, TIAN Yunfei, MIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. *Smart Power*, 2023, 51(8): 1-7.
- [29] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3094-3106.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3094-3106.

作者简介:



徐慧慧

徐慧慧(1989), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统运行与低碳技术相关工作(E-mail: 489754125@qq.com);

赵宇洋(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统优化运行相关工作;

田云飞(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 从事新能源及电网故障分析工作。

A low-carbon dispatching strategy for energy cascade optimization of virtual power plants with organic Rankine cycle

XU Huihui¹, ZHAO Yuyang¹, TIAN Yunfei¹, PENG Jing¹, LUO Shenghang², LIANG Ning²

(1. Institute of Economic Technology, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To enhance the economy and low-carbon of virtual power plant scheduling considering exergy efficiency, a cascade optimization low-carbon scheduling strategy of virtual power plant considering organic Rankine cycle is put forward. Firstly, with the goal of increasing exergy efficiency of heat energy, the mechanism of organic Rankine cycle power generation is studied and a mathematical model of utilization of low quality waste heat output is established. Secondly, the coupling mechanism of organic Rankine cycle and power-to-gas device in virtual power plant is studied, and a carbon reduction guidance model considering cascade carbon trading is established to realize the coupling of cascade utilization of thermal energy and low-carbon scheduling in virtual power plant. Then, the carbon emission right model including cogeneration unit, gas boiler and gas load is established to clarify the carbon emission responsibility. Finally, the multi-load comprehensive demand response model including electricity, heat and gas is established on the load side, and the low-carbon scheduling model of cascade optimization of virtual power plant energy is established with the minimum total cost of virtual power plant as the optimization goal. The simulation results show that the proposed scheduling strategy can improve the energy efficiency and low carbon efficiency of the virtual power plant.

Keywords: virtual power plant; organic Rankine cycle; cascade utilization of thermal energy; low-carbon scheduling; integrated demand response; stepwise carbon trading

(编辑 方晶)