

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241436

基于博弈交叉效率评估的农业园区多能源系统优化调度

杨文新¹, 杨旭海^{1,2}, 张茜^{1,2}, 周香¹, 方嘉宏¹, 吴雨洪¹

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 随着现代农业园区能源需求的增长以及对可持续发展的追求, 实现其高效、经济和环保运行成为亟待解决的问题。因此, 提出了一种基于博弈交叉效率评估的农业园区多能源系统优化调度方法, 旨在提升多能源系统机组的运行效率。首先, 从生物质燃料的能源特性出发, 建立生物质热电联产模型。同时, 考虑氢能的特点和能源特性, 建立氢能产-储-用模型。其次, 基于交叉效率构建博弈交叉效率评估模型, 根据多能源系统机组参评指标求解各个机组效率值。然后, 构建效率项, 以系统运行成本项、环境成本项、效率项作为目标函数建立优化调度模型, 并使用求解器 CPLEX 进行求解。算例结果表明, 所提策略能有效提升多能源系统机组的运行效率。

关键词: 博弈交叉效率; 生物质发电; 多能源系统; 氢能; 优化调度

Optimal scheduling of multi-energy systems in agricultural parks based on game cross-efficiency evaluation

YANG Wenxin¹, YANG Xuhai^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, ZHOU Xiang¹, FANG Jiahong¹, WU Yuhong¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China)

Abstract: With the growing energy demand in modern agricultural parks and the pursuit of sustainable development, achieving efficient, economical, and environmentally friendly operations has become an urgent issue. To this end, an optimization scheduling method for multi-energy systems in agricultural parks based on game cross-efficiency evaluation is proposed to enhance the operational efficiency of multi-energy system units. First, a biomass combined heat and power (CHP) model is established considering the energy characteristics of biomass fuels. At the same time, a hydrogen production-storage-utilization model is developed taking into account the properties and energy features of hydrogen. Subsequently, a game cross-efficiency evaluation model is constructed based on cross-efficiency, through which the efficiency values of each multi-energy unit are calculated according to the evaluation indicators. Then, by incorporating efficiency into the objective function together with system operating cost and environmental cost, an optimization scheduling model is formulated and solved using the CPLEX solver. Case study results demonstrate that the proposed strategy effectively enhances the operational efficiency of multi-energy system units.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 32360605).

Key words: game cross-efficiency; biomass power generation; multi-energy system; hydrogen storage; optimal scheduling

0 引言

2022年中央一号文件强调“要加快现代农业园区建设, 引导农产品加工企业向园区集中和向产地下沉^[1]”。但是, 农业园区通常位于配电网的末端, 电力供应能力有限, 使得农业园区面临着生产安全和能源安全的双重挑战^[2]。因此, 构建以可再生能

源和储能为主导, 并与大电网互联的多能源系统, 对于实现农业园区化和农业现代化至关重要^[3]。

其中, 风力、光伏发电因其周期性和不确定性, 难以提供稳定的电力供应^[4-7]。结合农业场景, 研究者提出, 引入生物质能^[8]和氢能^[9], 以增强多能源系统的稳定性。文献[10]提出绿电制备绿氢。文献[11-12]提出含氢储的能量梯级利用策略。文献[13]提出含氢能和碳捕获系统的低碳最优调度。同时, 也有许多针对生物质能的研究。文献[14]提出风光生物质互补的热电联供系统, 文献[15]建立含沼气

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(32360605); 兵团核心技术攻关项目资助(2023AA503)

的农业园区能源系统优化模型, 文献[16]提出含生物质能的农村园区负碳优化调度。但是, 针对同时含生物质能和氢能的多能源系统研究较少^[17]。

上述研究主要以经济成本和环境成本作为评价指标, 尚未引入效率评估的概念。数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法基于多个输入、输出指标, 可以对参评单元进行综合评价^[18]。文献[19]基于 DEA 对城市综合能源系统进行能效评价。文献[20]提出三阶段 DEA 评估农业整体能源效率。但是, 传统 DEA 存在多重最优解、主观性较强等问题。文献[21]提出基于交叉超效率的综合能源系统效率评价方法。文献[22]基于交叉效率评估(cross-efficiency evaluation, CEE)方法对全球 168 个经济体的能源效率进行评估。以上研究尚未考虑参评单元之间存在的竞争关系和互动行为。文献[23]基于非合作博弈两阶段 DEA 对能源环境效率进行评价。文献[24]基于博弈交叉效率方法评估虚拟电厂成员。然而, 以上研究侧重效率评估的精度和区分度, 尚未探讨如何利用效率评估结果优化能量调度以提升系统效率。

鉴于此, 本文提出基于博弈交叉效率评估的农业园区多能源系统能量优化调度。首先, 阐述含有生物质热电联产机组、氢能产-储-用的农业园区多能源系统架构, 建立涵盖生物质热电联产、氢能产-储-用、风力光伏发电、储能设备的各机组稳态运行模型; 其次, 基于交叉效率评估构建博弈交叉效率评估模型, 建立机组的参评指标; 然后, 构建基于博弈交叉效率评估的多能源系统优化调度模型, 以运行成本项、环境成本项、效率项构建综合目标函数; 最后, 通过算例验证所提方法的有效性。

1 农业园区多能源系统的运行架构及建模

1.1 多能源系统的运行架构

本文所提含生物质能和氢能的农业园区多能源系统(multi-energy system, MES)结构如图 1 所示。

图 1 中, 供能单元包括: 生物质热电联产(biomass combined heat and power, B CHP)机组、风力发电(wind turbine, WT)、光伏发电(photovoltaic, PV)、大电网(Grid)、氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC); 储能设备包括: 储热罐(thermal energy storage, TES)、储氢罐(hydrogen storage tank, HST)、蓄电池(battery, BAT); 负荷设备包括: 以电制热设备(electrical heating device, EHD)、电解槽(hydrogen electrolyzer, HEL)和农业用电为主的电负荷; 以吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、温室大棚、果蔬烘干为代表的热负荷; 以冷藏仓库为主的冷负荷。

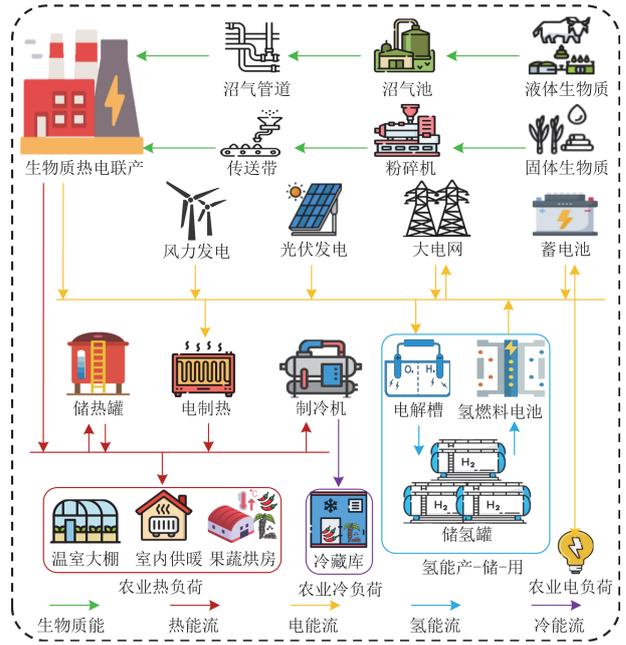


图 1 农业园区 MES 运行架构

Fig. 1 Operation architecture of MES in agricultural park

1.2 生物质热电联产机组模型

当前生物质发电主要包括直接燃烧发电、混合燃烧发电和气化发电 3 种模式, 其中, 直接燃烧发电成本投入小, 气化发电燃烧效率高^[25]。生物质热电联产机组综合了两者优势, 原理如图 2 所示^[26]。

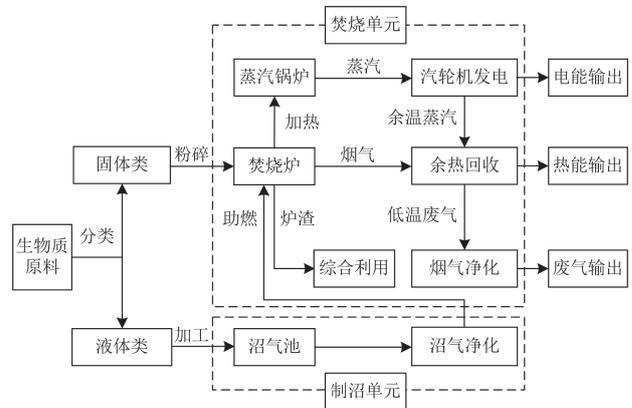


图 2 B CHP 机组工作原理

Fig. 2 Working principle diagram of B CHP unit

图 2 包括两个部分: 焚烧单元、制沼单元。生物质原料分类为固体类和液体类, 固体类加工后焚烧, 液体类制沼助燃, 其模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} m_i^L = m_i^{\text{Dry}} + m_i^{\text{Wet}} \\ m_i^{\text{Dry}} = \lambda_i^{\text{Dry}} m_i^L \\ m_i^{\text{Wet}} = \lambda_i^{\text{Wet}} m_i^L \\ \lambda_i^{\text{Dry}} + \lambda_i^{\text{Wet}} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： m_t^L 为 t 时刻内生物质的总量； m_t^{Dry} 、 m_t^{Wet} 分别为 t 时刻固体、液体生物质的质量； λ_t^{Dry} 、 λ_t^{Wet} 分别为 t 时刻固体、液体生物质占生物质总量的比例。焚烧单元模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} V_t^{\text{IG}} = \eta^{\text{comb}} \alpha^u (m_t^{\text{Dry}} + m_t^{\text{Bio}}) \\ P_t^{\text{IG}} = \eta^{\text{G,e}} \mu^{\text{G}} V_t^{\text{IG}} \\ \alpha^u = \lambda^{\text{D}} \alpha^{\text{Dry}} + \lambda^{\text{B}} \alpha^{\text{Bio}} \\ \lambda^{\text{D}} + \lambda^{\text{B}} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： V_t^{IG} 为 t 时刻焚烧单元产生的高温烟气体积； η^{comb} 为燃烧室运行效率； α^u 为固体生物质和沼气的混合燃烧热值； m_t^{Bio} 为 t 时刻沼气质量； P_t^{IG} 为 t 时刻焚烧单元输出电量； $\eta^{\text{G,e}}$ 为蒸汽锅炉效率； μ^{G} 为汽轮机发电效率； λ^{D} 、 λ^{B} 分别为固体生物质和沼气的占比系数； α^{Dry} 、 α^{Bio} 分别为固体生物质和沼气的燃烧热值。制沼单元模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} V_t^{\text{Wet}} = P_t^{\text{Wet}} \eta^{\text{Wet}} \alpha^{\text{Wet}} \\ m_t^{\text{se}} = \rho^{\text{se}} V_t^{\text{Wet}} \\ P_t^{\text{B}} = \eta^{\text{B}} m_t^{\text{se}} \\ P_t^{\text{Bio}} = \eta^{\text{Bio}} P_t^{\text{B}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： V_t^{Wet} 、 P_t^{Wet} 分别为 t 时刻处理液体生物质的体积和耗电量； η^{Wet} 为单位电量可处理液体生物质的体积； α^{Wet} 为可发酵的有机物系数； m_t^{se} 为 t 时刻可发酵有机污水的体积； ρ^{se} 为污水静置后的密度； P_t^{B} 为 t 时刻产生的沼气总量； η^{B} 为沼气池产沼系数； P_t^{Bio} 为 t 时刻经过净化输出的沼气流； η^{Bio} 为沼气净化系数。BCHP 输出模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{BCHP-P}} = P_t^{\text{IG}} - P_t^{\text{Wet}} \\ P_t^{\text{BCHP-H}} = P_t^{\text{BCHP-P}} (\lambda^{\text{h}} / \lambda^{\text{p}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_t^{\text{BCHP-P}}$ 为 t 时刻 BCHP 电能输出功率； $P_t^{\text{BCHP-H}}$ 为 t 时刻 BCHP 热能输出功率； λ^{p} 、 λ^{h} 分别表示 BCHP 的产电、产热系数。

1.3 氢能产储用模型

质子交换膜电解槽的产氢纯度高,响应速度快,能够实时响应可变电力输入,实现动态制氢与功率快速调节,有效应对风能光能发电的波动问题。本文忽略电解槽、储氢罐、氢燃料电池的参数动态变化和余热利用环节。氢能产-储-用机组的运行模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{HEL,H}_2} = \eta^{\text{HEL,H}_2} P_t^{\text{HEL}} \\ P_t^{\text{HFC,e}} = \eta^{\text{HFC}} P_t^{\text{HFC,H}_2} \\ S_t^{\text{HST}} = S_{t-1}^{\text{HST}} + \eta^{\text{ch,H}_2} P_t^{\text{ch,H}_2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_t^{\text{HEL,H}_2}$ 为 t 时刻电解槽生产氢气功率； $\eta^{\text{HEL,H}_2}$ 为电解槽制氢效率； P_t^{HEL} 为 t 时刻电解槽的耗电功率； $P_t^{\text{HFC,e}}$ 为 t 时刻氢燃料电池输出电功率； η^{HFC} 为氢燃料电池的转化效率； $P_t^{\text{HFC,H}_2}$ 为 t 时刻氢燃料电池消耗氢气功率； S_t^{HST} 为 t 时刻储氢罐含量； $\eta^{\text{ch,H}_2}$ 为氢气罐充氢效率； $P_t^{\text{ch,H}_2}$ 为 t 时刻氢气充入功率。

2 博弈交叉效率模型

2.1 交叉效率模型

假设多能源系统的能源供给侧有 n 个机组作为决策单元(decision-making unit, DMU)参评,且每个 DMU 均有 m 种投入指标和 s 种产出指标,则 DMU $_j$ ($j=1,2,\dots,n$) 的第 i 种输入和第 r 种输出分别记为 $\tilde{X}_{ij} = (\tilde{x}_{1j}, \tilde{x}_{2j}, \dots, \tilde{x}_{mj})$ 和 $\tilde{Y}_{rj} = (\tilde{y}_{1j}, \tilde{y}_{2j}, \dots, \tilde{y}_{sj})$ 。考虑到不同种类 DMU 的投入与产出数据在数值量级方面的差异,需要对初始数据进行归一化处理,归一化公式如式(6)和式(7)所示。

$$x_{ij} = a + (b - a) \cdot \frac{\tilde{X}_{ij} - \min \tilde{X}_{ij}}{\max \tilde{X}_{ij} - \min \tilde{X}_{ij}} \quad (6)$$

$$y_{rj} = a + (b - a) \cdot \frac{\tilde{Y}_{rj} - \min \tilde{Y}_{rj}}{\max \tilde{Y}_{rj} - \min \tilde{Y}_{rj}} \quad (7)$$

式中： x_{ij} 为 DMU $_j$ 的第 i 种输入指标的归一化值； y_{rj} 为 DMU $_j$ 的第 r 种输出指标的归一化值； b 、 a 分别为归一化的上、下限。若每个 DMU $_j$ 有 m 个投入指标和 s 个产出指标,则 m 和 s 满足如式(8)所示的约束。

$$n \geq \max \{m \cdot s, 3 \cdot (m + s)\} \quad (8)$$

CCR 模型是 DEA 方法最经典的模型,是由 A. Charnes、W. W. Cooper 和 E. Rhodes 共同提出并以其首字母组合命名的。假若对于第 d 个决策单元,记为 DMU $_d$,其相对效率值可通过 CCR 模型^[18]得到,如式(9)所示。

$$\begin{cases} E_d = \max \left(\sum_{r=1}^s u_{rd} y_{rd} / \sum_{i=1}^m \omega_{id} x_{id} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m \omega_{id} x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_{rd} y_{rj} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^m \omega_{id} x_{id} = 1, \omega_{id} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ \mu_{rd} \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \end{cases} \quad (9)$$

式中： E_d 为 DMU $_d$ 的相对效率值； u_{rd} 为 DMU $_d$ 的第 r 种输出指标的权重； y_{rd} 为 DMU $_d$ 的第 r 种输出指标的值； ω_{id} 为输入 DMU $_d$ 的第 i 种输入指标的权

重; x_{id} 为 DMU_d 的第 i 种输入指标的值; 记式(9)的最优解为 $(\omega_{id}^*, \mu_{rd}^*)$ 。在 DMU_d 的最优权重下, DMU_j 的效率值求解如式(10)所示。

$$E_{dj} = \frac{\sum_{r=1}^s \mu_{rj}^* y_{rj}}{\sum_{i=1}^m \omega_{ij}^* x_{ij}}, \quad d, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: E_{dj} 为 DMU_j 在 DMU_d 的最优权重下的 d -交叉效率值; $(\omega_{ij}^*, \mu_{rj}^*)$ 为 DMU_j 在式(9)中的最优解; 当 d 的取值遍历机组总数, 各 E_{dj} 的平均值求解如式(11)所示。

$$\alpha_j = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n E_{dj} \quad (11)$$

式中: α_j 为 DMU_j 的交叉效率值。

2.2 博弈交叉效率模型

上述交叉效率模型未考虑 DMU 之间存在的竞争关系, 因此引入博弈论^[18]。记 DMU_d 的交叉效率值为 α_d , 则 DMU_j 会在 DMU_d 的 α_d 不被降低的同时, DMU_j 最大化自身效率值 ($j \neq d$), 直至得到全局最优解 α_{dj} , 其数学模型如式(12)所示^[19]。

$$\alpha_{dj} = \frac{\sum_{r=1}^s \mu_{rj}^d y_{rj}}{\sum_{i=1}^m \omega_{ij}^d x_{ij}}, \quad d = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中: α_{dj} 为 DMU_j 对于 DMU_d 的博弈 d -交叉效率值; μ_{rj}^d 、 ω_{ij}^d 为式(9)得出的可行权重。 α_{dj} 的约束条件如式(13)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^d y_{rj} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m \omega_{ij}^d x_{ik} - \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^d y_{rk} \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^m \omega_{ij}^d x_{ij} = 1 \\ \alpha_d \sum_{i=1}^m \omega_{ij}^d x_{id} - \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^d y_{rd} \leq 0, \quad \alpha_d \leq 1 \\ \omega_{ij}^d \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \mu_{rj}^d \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \end{array} \right. \quad (13)$$

式中: x_{ik} 和 y_{rk} 分别为第 k 个决策单元 DMU_k 的第 i 个输入值和第 r 个输出值; α_d 为 DMU_d 的交叉效率值, 其初始值为 E_d 。式(13)进行循环计算, 每次循

环 α_d 取值更新为 α_j (α_j 为 DMU_j 相对其他 DMU 的平均博弈交叉效率值), 直至 α_j 收敛, α_j 的求解如式(14)所示。

$$\alpha_j = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^{d*}(\alpha_d) y_{rj} \quad (14)$$

式中: $\mu_{rj}^{d*}(\alpha_d)$ 为式(10)中的最优解权重。

2.3 多能源系统参评机组及指标

参考文献[24], 以机组投入成本和能源转化效率为导向, 为 MES 建立如表 1 所示的评价指标。

表 1 多能源系统机组评价指标

Table 1 Evaluation indexes of MES units		
参评机组信息	评价指标	指标类型
24 h 内供能机组、 储能设备每小时对 应的调度出力 及使用成本	机组容量	投入指标
	维护成本	投入指标
	折旧成本	投入指标
	燃料成本	投入指标
	能量转换损耗	投入指标
	碳排放量	产出指标-非期望
	输出功率	产出指标-期望

表 1 中, 考虑节能减排, 将碳排放量列为非期望产出指标。储能设备能量充入视为负荷耗能。

3 基于博弈交叉效率评估的农业园区多能源系统优化调度模型

基于博弈交叉效率评估的农业园区多能源系统优化调度模型的求解流程如图 3 所示。

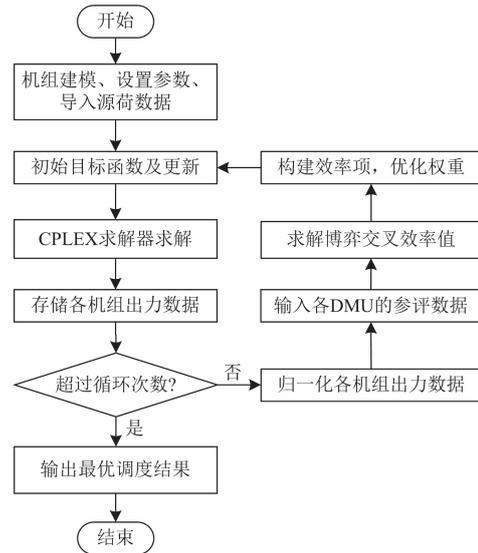


图 3 求解流程图

Fig. 3 Solution flow chart

图 3 中, 在构建效率项时, 使用粒子群算法优化效率项中各机组效率对应的权重系数。

3.1 目标函数

本文目标函数如式(15)所示。

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (15)$$

式中: F 为总目标函数; F_1 为运行成本项; F_2 为环境成本项; F_3 为效率项。其中, F_1 如式(16)所示。

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \left(C_t^{\text{PV}} + C_t^{\text{WT}} + C_t^{\text{Grid}} + C_t^{\text{HEL}} + C_t^{\text{HFC}} + C_t^{\text{BCHP-P}} + C_t^{\text{BCHP-H}} + C_t^{\text{BAT}} + C_t^{\text{HST}} + C_t^{\text{TES}} \right) \quad (16)$$

式中: C_t^{PV} 、 C_t^{WT} 、 C_t^{Grid} 、 C_t^{HEL} 、 C_t^{HFC} 、 $C_t^{\text{BCHP-P}}$ 、 $C_t^{\text{BCHP-H}}$ 、 C_t^{BAT} 、 C_t^{HST} 、 C_t^{TES} 分别为 t 时刻光伏、风力、从电网购电、电解槽、氢燃料电池、BCHP-P、BCHP-H、蓄电池、储氢罐、储热罐的运营成本, 其计算参考文献[5]。 F_2 如式(17)所示。

$$F_2 = \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{Grid,C}} + C_t^{\text{BCHP-P,C}} + C_t^{\text{BCHP-H,C}}) \quad (17)$$

式中: $C_t^{\text{Grid,C}}$ 为 t 时刻电网购电的碳排放量; $C_t^{\text{BCHP-P,C}}$ 和 $C_t^{\text{BCHP-H,C}}$ 分别为 t 时刻 BCHP 的产电碳排放量和产热碳排放量, 其计算参考文献[15]。 F_3 如式(18)所示。

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \left(\alpha_1 (P_t^{\text{PV}} / \bar{E}^{\text{PV}}) + \alpha_2 (P_t^{\text{WT}} / \bar{E}^{\text{WT}}) + \alpha_3 (P_t^{\text{HFC}} / \bar{E}^{\text{HFC}}) + \alpha_4 (P_t^{\text{HEL}} / \bar{E}^{\text{HEL}}) + \alpha_5 (P_t^{\text{BCHP-P}} / \bar{E}^{\text{BCHP-P}}) + \alpha_6 (P_t^{\text{BCHP-H}} / \bar{E}^{\text{BCHP-H}}) + \alpha_7 (P_t^{\text{TES}} / \bar{E}^{\text{TES}}) + \alpha_8 (P_t^{\text{HST}} / \bar{E}^{\text{HST}}) + \alpha_9 (P_t^{\text{BAT}} / \bar{E}^{\text{BAT}}) + \alpha_{10} (P_t^{\text{Grid}} / \bar{E}^{\text{Grid}}) \right) \quad (18)$$

式中: $\alpha_1 - \alpha_{10}$ 为各机组对应权重系数; \bar{E}^{PV} 、 \bar{E}^{WT} 、 \bar{E}^{HFC} 、 \bar{E}^{HEL} 、 $\bar{E}^{\text{BCHP-P}}$ 、 $\bar{E}^{\text{BCHP-H}}$ 、 \bar{E}^{TES} 、 \bar{E}^{HST} 、 \bar{E}^{BAT} 、 \bar{E}^{Grid} 分别为光伏、风机、HFC、电解槽、BCHP-P、BCHP-H、储热罐、储氢罐、蓄电池、电网购电的效率值的平均值; P_t^{PV} 、 P_t^{WT} 、 P_t^{HFC} 、 P_t^{HEL} 、 $P_t^{\text{BCHP-P}}$ 、 $P_t^{\text{BCHP-H}}$ 、 P_t^{TES} 、 P_t^{HST} 、 P_t^{BAT} 、 P_t^{Grid} 分别为 t 时刻各机组的输出功率。其中, 效率均值的求解如式(19)所示。

$$\bar{E} = \frac{\sum_{t=1}^T E_t}{T} \quad (19)$$

式中: \bar{E} 为某个参评机组的效率均值; E_t 为该机组在 t 时刻的效率值; T 为调度周期的时长。

3.2 约束条件

约束条件包括功率平衡约束、机组出力约束。

3.2.1 功率平衡约束

功率平衡约束分为电功率平衡、热功率平衡、冷功率平衡约束, 分别如式(20)一式(22)所示。

1) 电功率平衡约束

$$P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{Buy}} + P_t^{\text{BCHP-P}} + P_t^{\text{HFC,e}} + P_t^{\text{BAT,dis}} = P_t^{\text{Load}} + P_t^{\text{HEL}} + P_t^{\text{EHD}} + P_t^{\text{BAT,cha}} + P_t^{\text{Sell}} \quad (20)$$

式中: P_t^{Buy} 、 P_t^{Sell} 分别为 t 时刻向大电网购、售电量; $P_t^{\text{HFC,e}}$ 为 t 时刻氢燃料电池输出电功率; $P_t^{\text{BAT,cha}}$ 、 $P_t^{\text{BAT,dis}}$ 分别为 t 时刻蓄电池充放电功率; P_t^{Load} 为 t 时刻电负荷; P_t^{HEL} 为 t 时刻电解槽耗电量; P_t^{EHD} 为 t 时刻电制热设备耗电量。

2) 热功率平衡约束

$$P_t^{\text{BCHP-H}} + P_t^{\text{EHD,h}} + P_t^{\text{TES,dis}} = P_t^{\text{H,Load}} + P_t^{\text{TES,cha}} + P_t^{\text{AC,h}} \quad (21)$$

式中: $P_t^{\text{EHD,h}}$ 为 t 时刻电制热设备的产热量; $P_t^{\text{TES,cha}}$ 、 $P_t^{\text{TES,dis}}$ 分别为储热罐的注入和释放热功率; $P_t^{\text{H,Load}}$ 为 t 时刻热负荷数值; $P_t^{\text{AC,h}}$ 为 t 时刻吸收式制冷机的耗热量。

3) 冷功率平衡约束

$$P_t^{\text{AC,c}} = P_t^{\text{C,Load}} \quad (22)$$

式中: $P_t^{\text{AC,c}}$ 和 $P_t^{\text{C,Load}}$ 分别为 t 时刻 AC 的冷功率和冷负荷。

3.2.2 机组出力约束

1) 生物质热电联产出力约束

生物质热电联产机组出力约束如式(23)所示。

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{BCHP-P}} \leq P_t^{\text{BCHP-P}} \leq P_{\max}^{\text{BCHP-P}} \\ P_{\min}^{\text{BCHP-H}} \leq P_t^{\text{BCHP-H}} \leq P_{\max}^{\text{BCHP-H}} \\ \Delta P_{\min}^{\text{BCHP-P}} \leq P_{t+1}^{\text{BCHP-P}} - P_t^{\text{BCHP-P}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{BCHP-P}} \\ \Delta P_{\min}^{\text{BCHP-H}} \leq P_{t+1}^{\text{BCHP-H}} - P_t^{\text{BCHP-H}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{BCHP-H}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{\min}^{\text{BCHP-P}}$ 、 $P_{\max}^{\text{BCHP-P}}$ 分别为 BCHP-P 的功率上、下限; $P_{\min}^{\text{BCHP-H}}$ 、 $P_{\max}^{\text{BCHP-H}}$ 分别为 BCHP-H 的功率上、下限; $\Delta P_{\min}^{\text{BCHP-P}}$ 、 $\Delta P_{\max}^{\text{BCHP-P}}$ 分别为 BCHP-P 爬坡功率上、下限; $\Delta P_{\min}^{\text{BCHP-H}}$ 、 $\Delta P_{\max}^{\text{BCHP-H}}$ 分别为 BCHP-H 爬坡功率的上、下限。

2) 电解氢及氢燃料电池出力约束

电解氢及氢燃料电池模型约束如式(24)所示。

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{HEL}} \leq P_t^{\text{HEL}} \leq P_{\max}^{\text{HEL}} \\ \Delta P_{\min}^{\text{HEL,H}_2} \leq P_{t+1}^{\text{HEL,H}_2} - P_t^{\text{HEL,H}_2} \leq \Delta P_{\max}^{\text{HEL,H}_2} \\ \eta_{\min}^{\text{HEL,H}_2} \leq \eta_{t+1}^{\text{HEL,H}_2} \leq \eta_{\max}^{\text{HEL,H}_2} \\ P_{\min}^{\text{HFC,e}} \leq P_t^{\text{HFC,e}} \leq P_{\max}^{\text{HFC,e}} \\ \Delta P_{\min}^{\text{HFC,e}} \leq P_{t+1}^{\text{HFC,e}} - P_t^{\text{HFC,e}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{HFC,e}} \\ \eta_{\min}^{\text{HFC}} \leq \eta_{t+1}^{\text{HFC}} \leq \eta_{\max}^{\text{HFC}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: P_{\min}^{HEL} 、 P_{\max}^{HEL} 分别为 HEL 的输入电功率上、下限; $\Delta P_{\min}^{\text{HEL,H}_2}$ 、 $\Delta P_{\max}^{\text{HEL,H}_2}$ 分别为 HEL 产氢的爬坡约束上、下限; $\eta_{\min}^{\text{HEL,H}_2}$ 、 $\eta_{\max}^{\text{HEL,H}_2}$ 分别为电转氢效率

上、下限; $P_{\max}^{\text{HFC},e}$ 、 $P_{\min}^{\text{HFC},e}$ 分别为 HFC 输出电功率的上、下限; $\Delta P_{\max}^{\text{HFC},e}$ 、 $\Delta P_{\min}^{\text{HFC},e}$ 分别为 HFC 爬坡约束上、下限; η_{\max}^{HFC} 、 η_{\min}^{HFC} 分别为 HFC 氢转电效率值的上、下限。其余常规机组约束参考文献[10]。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文数据来自于新疆某农业园区多能源系统, 采样时间从 2023 年 7 月—2024 年 7 月。各个季节典型日的电负荷、热负荷、风力发电、光伏发电曲线如图 4 所示。

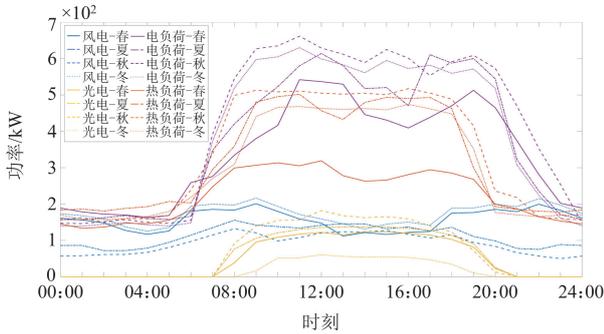


图 4 各季节典型日源荷曲线

Fig. 4 Typical daily source-load curves of each season

MES 向大电网购电采用分时电价, 如附录 A 表 A1, 天然气价格为 0.35 元/kWh^[28]。所建模型在 MATLAB 平台中, 利用 CPLEX 求解, 设置调度周期为 24 h。实验方案 1—方案 6 对比如表 2 所示。

表 2 中, 方案 1、2 使用天然气作为热电联产的能源, 其电量和热量输出分别使用 CHP-P 和 CHP-H 表示; 通过方案 1 和 2, 方案 3 和 4, 方案 5 和 6 形成横向对比, 探索从效率角度进行能量策略优化的有效性。方案 1、3、5 和方案 2、4、6 形成纵向

对比, 探索生物质能和氢能相结合的调峰能力。

表 2 方案 1—方案 6 对比

Table 2 Comparison of Plan 1—6

方案	生物质能	氢能	效率项
1	×	×	×
2	×	×	√
3	√	×	×
4	√	×	√
5	√	√	×
6	√	√	√

4.2 效率值分析

方案 1、2 各机组效率值见表 3, 方案 3、4 各机组效率值见表 4, 方案 5、6 各机组效率值见表 5。

由表 3 可知, 在 4 个季节中, 方案 2 各个机组效率均值高于方案 1, 其中, 春季效果最明显, 效率均值提高了 5.4%, 冬季效率均值只提高了 0.83%; 相比方案 1, 方案 2 中 CHP-P、CHP-H、储热罐的效率值均得到提高。除了春季场景, 电制热设备, 大电网的效率值呈现下降趋势。

由表 4 可知, 各季节中, 方案 4 各机组效率均值高于方案 3, 其中, 秋季效率均值提高了 4.26%, 夏季效率均值只提高了 0.24%; 相比方案 3, 方案 4 中的蓄电池、BCHP-P、BCHP-H、储热罐、电制热设备的效率值在多数季节有所提高, 方案 4 中 BCHP-H 的效率值在各季节中均保持在 90% 以上。

由表 5 可知, 各季节中, 方案 6 的效率均值均高于方案 5, 其中, 秋季效率均值提升了 12.36%, 春季效率均值只提高了 0.64%; 相比于方案 5, 方案 6 中氢燃料电池、BCHP-P、BCHP-H、储热罐的效率值有明显提升; 氢燃料电池效率值 4 个季节分别提升了 28.12%、20.81%、32.58%、28.37%; 储热罐效率值 4 个季节分别提升了 0.18%、5.11%、35.55%、1.46%;

表 3 方案 1 和方案 2 各个机组效率值

Table 3 Efficiency values of each unit in Plan 1 and Plan 2

	春季		夏季		秋季		冬季	
	方案 1	方案 2						
风机	97.98	98.62	93.42	94.57	83.22	86.97	95.56	96.00
光伏	81.76	85.73	73.82	76.57	67.35	71.03	58.58	61.16
蓄电池	81.08	82.73	72.15	73.15	63.09	64.84	67.33	64.16
CHP-P	82.92	86.43	86.03	91.54	86.32	94.81	79.70	86.72
CHP-H	85.34	90.01	87.75	94.91	86.48	95.88	83.87	92.05
电制热	62.21	74.47	67.86	63.11	66.07	60.16	68.21	62.21
大电网	67.28	76.61	58.59	54.93	60.68	49.37	54.43	49.23
储热罐	73.99	81.13	63.15	66.04	50.86	55.20	58.21	61.03
效率均值	79.06	84.46	75.35	76.81	70.51	72.28	70.74	71.57

表 4 方案 3 和方案 4 各个机组效率值
Table 4 Efficiency values of each unit in Plan 3 and Plan 4

	春季		夏季		秋季		冬季	
	方案 3	方案 4						
	风机	98.75	98.88	94.46	94.65	82.25	89.34	95.95
光伏	87.18	87.88	76.33	76.80	66.50	73.59	60.88	61.58
蓄电池	84.69	85.91	64.63	73.73	61.42	67.92	67.54	65.25
BCHP-P	86.46	87.34	92.06	92.30	93.67	94.32	86.92	87.08
BCHP-H	89.76	90.80	95.35	95.29	94.36	96.18	92.32	92.42
电制热	77.23	79.08	64.88	64.31	58.57	61.05	61.13	61.37
大电网	77.18	79.83	55.35	55.03	49.99	50.47	49.11	49.88
储热罐	85.29	87.25	68.68	69.85	51.51	59.27	61.17	63.43
效率均值	85.82	87.12	77.24	77.48	69.76	74.02	71.88	72.13

表 5 方案 5 和方案 6 各个机组效率值
Table 5 Efficiency values of each unit in Plan 5 and Plan 6

	春季		夏季		秋季		冬季	
	方案 5	方案 6						
	风机	93.37	93.43	85.64	85.21	74.02	72.42	90.48
光伏	81.89	79.83	59.48	58.98	58.16	57.84	35.83	35.61
氢燃料电池	39.28	67.40	51.02	71.83	51.45	84.03	47.17	75.54
蓄电池	76.65	76.09	56.90	47.25	53.94	47.15	49.60	39.45
储氢罐	50.85	77.65	67.74	64.37	66.40	95.58	67.51	71.80
BCHP-P	76.61	85.95	86.18	91.12	82.26	93.53	75.16	81.49
BCHP-H	80.89	87.22	73.21	95.31	74.10	95.22	70.52	84.58
电制热	70.64	37.62	47.85	46.57	49.18	48.54	45.98	44.11
大电网	67.99	36.19	48.62	47.99	57.39	60.69	40.67	40.57
储热罐	40.91	41.09	36.98	42.09	33.49	69.04	31.12	32.58
效率均值	67.91	68.55	61.36	65.07	60.04	72.40	55.41	59.59

蓄电池效率值分别降低了 0.56%、9.25%、6.79%、10.15%。

针对表 3、表 4、表 5 作横向对比，各季节中的效率均值，方案 2 高于方案 1，方案 4 高于方案 3，方案 6 高于方案 5，说明加入效率项可以提升系统的运行效率。其中，方案 2 和方案 4 比方案 6 的均值增幅小，可能是机组数量较少使得优化潜力有限。

针对表 3、表 4、表 5 作纵向对比，效率均值方面，方案 3 高于方案 1，方案 4 高于方案 2，说明引入生物质能可以提高系统运行效率。表 5 中，增加氢燃料电池和储热罐单元后，其效率均值发生整体降低，这是因为增加了机组形成出力冗余。

4.3 经济性分析

方案 1—方案 6 在 4 个典型日的调度总成本如表 6 所示，运行成本、环境成本见附录 A 表 A2、表 A3。

从表 6 可知，方案 3、4 相比方案 1、2，系统的调度总成本明显降低，说明增加生物质能更具有

经济效益。方案 5、6 的调度总成本略高于方案 3、4，这是因为引入了电解槽、储氢罐、燃料电池等设备，增加了一部分运营成本，但是仍然低于方案 1、2。

表 6 方案 1—方案 6 系统调度总成本
Table 6 Total system scheduling cost for Plan 1—6

方案	系统调度总成本			
	春季	夏季	秋季	冬季
1	8246.89	11 527.22	13 273.57	11 402.12
2	8424.92	11 861.71	13 794.01	11 709.73
3	5884.41	8347.14	10 162.91	8546.26
4	5896.55	8504.27	10 375.04	8737.37
5	6047.93	9757.29	12 126.30	10 242.08
6	6286.01	10 429.47	12 880.64	10 971.68

由附录 A 表 A2 可知，对比方案 1、2，方案 3、4，方案 5、6，考虑效率项的优化调度提升了多能源系统的效率均值，但是会增加经济成本。

由附录 A 表 A3 可知, 引入生物质能使得环境成本增加, 这是因生物质燃料的燃烧热值较低。

4.4 机组出力时序分析

方案3—方案6的电力机组调度结果如图5所示。

图5中, 相比于方案3, 方案4的多能源系统从大电网的购电频次和总量降低, 尤其春季和夏季; EHD的工作频次和强度在春、夏、冬季节中发生降低; 并且, 方案4在春、夏季形成了以自主供电为主体的能源模式。相比于方案5, 方案6的多能源系统

在4个季节中, 向大电网的购电频次和总量发生了下降; BAT,dis在夏、秋、冬季的放电频次和单次放电量明显降低, 避免了蓄电池高强度、高频次充放电; HFC参与电力调度的程度显著增加, 主要集中在夏、秋季节的高峰负荷期和冬季的夜间。据此, 说明同样的多能源系统中, 效率项的加入可以调动机组的积极性, 增强系统自主供电能力, 减少向大电网购电频次和总量。

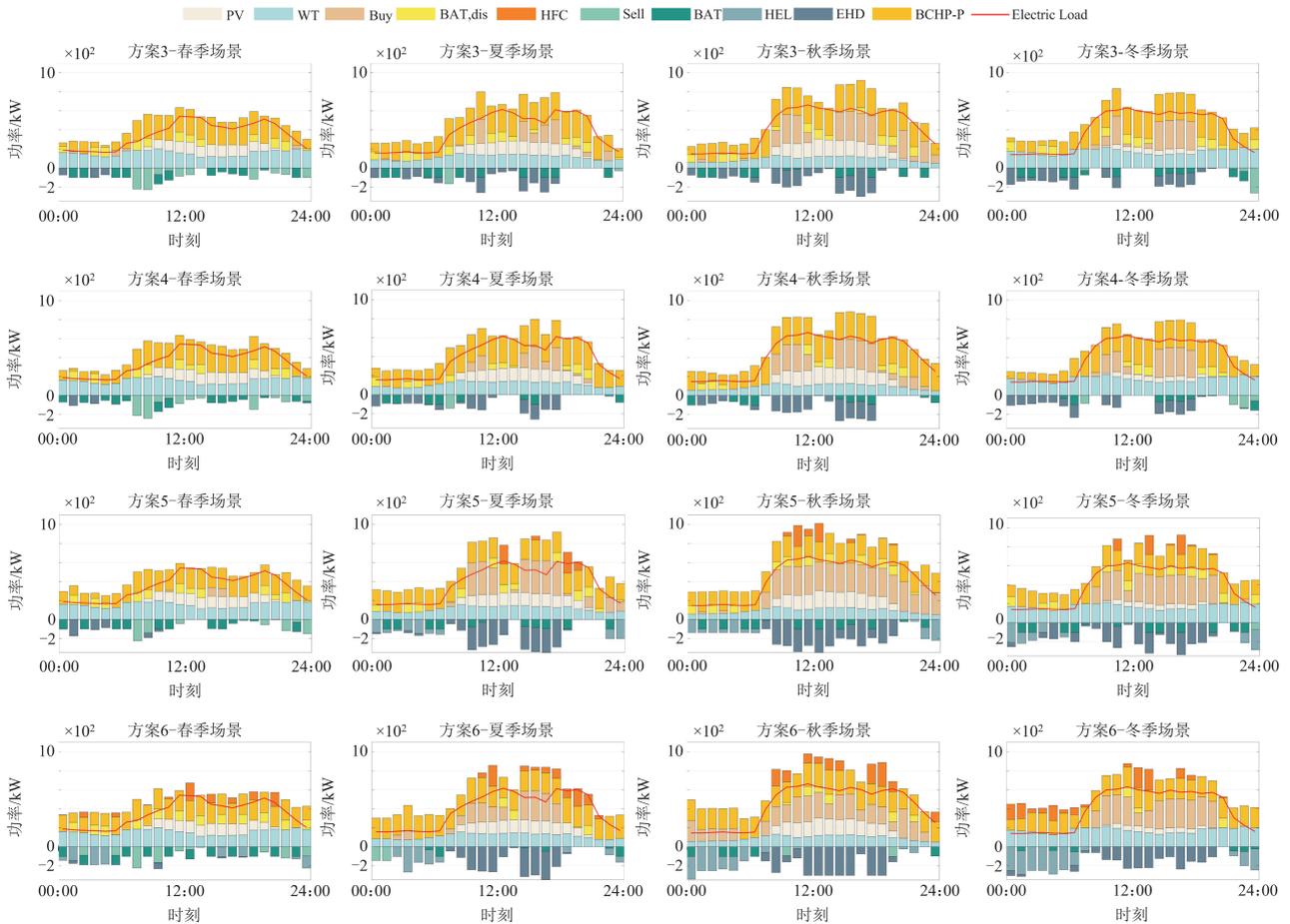


图5 方案3—方案6各场景下电力机组调度结果对比图

Fig. 5 Comparison of power unit scheduling results in Plan 3—6

相比于方案3、4, 在方案5、6的负荷高峰期, BCHP-P的出力强度均略微降低, 由HFC承担电能差额, 初步说明引入氢能有益于增强系统调峰能力, 避免机组应对负荷变化而出现发电突增和突降的情况, 同时, 为系统增加了发电余量。

方案1—方案4中机组数量较少, 因此, 选取方案5和方案6进行热力时序调度分析, 调度结果如图6所示。图6中, 相比方案5, 方案6在4个典型日场景中, BCHP-H和TES,dis参与热负荷平衡的程

度加大, EHD,h的出力呈现下降趋势, 这表明方案6充分利用现有资源, 减少了对额外电力加热设备的依赖。此外, 储热罐的高效调度有助于平滑热负荷波动, 降低了热量的浪费, 提高了系统运行稳定性。因此, 方案6在热量源荷平衡调度中更加出色。

综上, 在4个典型日场景中, 方案6所提调度模型提升了农业园区MES的运行效率, 降低了对大电网的依赖, 确保了更为合理的资源配置和机组出力。同时兼顾了经济效益。

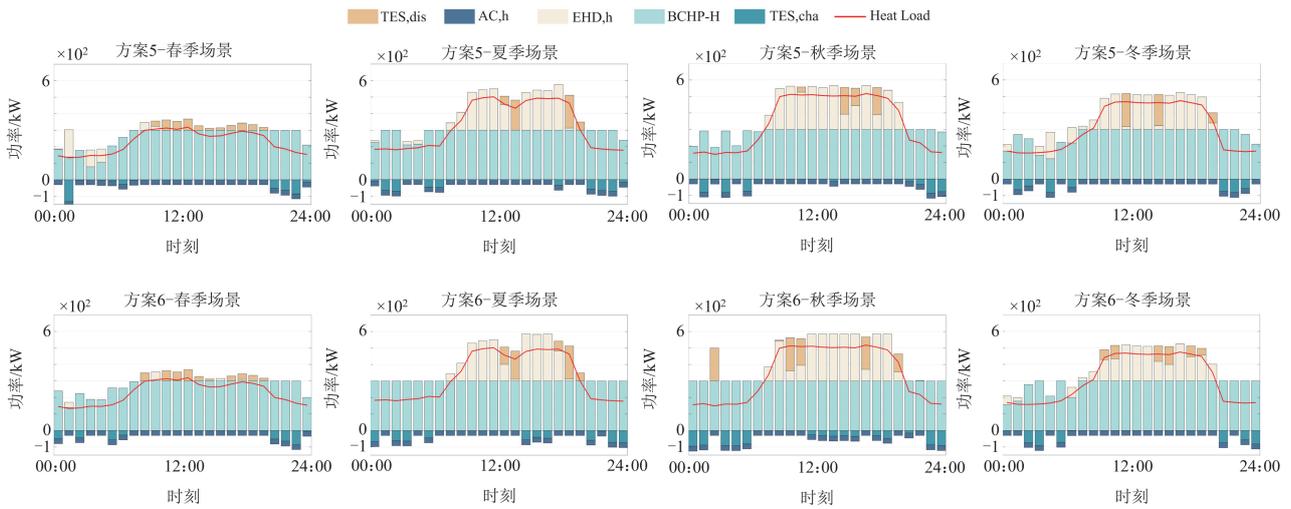


图 6 方案 5 和方案 6 各场景下热力机组调度结果对比图

Fig. 6 Comparison of scheduling results of thermal units under Plan 5 and 6

5 结论

本文提出基于博弈交叉效率评估的农业园区多能源系统优化调度策略，构建博弈交叉效率评估模型，求解生物质热电联产、氢能产储用等机组的效率值，构建效率项并将效率项纳入目标函数，提高了多能源系统的综合运行效率，得到结论如下所述。

1) 生物质能的引入可以使农业园区 MES 形成以可再生能源为主体的用能模式，减轻配电网的供电压力，降低农业园区能源成本，这与文献[27]的研究结果相符。引入氢能可以有效消纳可再生能源发电量，并长时间存储，在需要时进行释放，这增强了系统的调峰能力。同时，实验结果说明，生物质能与氢能相结合，在春夏秋冬季节中有着良好的调度潜力，可以更有效应对农业园区用能负荷季节性集中的问题，为农业园区现代化提供能源支撑。

2) 博弈交叉效率评估方法可以应用于多能源系统中，准确评估系统机组的运行效率。基于效率值构建的效率项，可以从效率角度对 MES 能量调度策略进行优化，减少设备闲置，提升系统综合运行效率。实验结果表明，当负荷曲线不变时，增加 MES 中机组数量，会导致 MES 效率均值降低。

本研究也存在一些局限：博弈交叉效率评估方法求解时间较长且对计算资源有较高要求。未来，将考虑农业园区 MES 与工业园区 MES 之间的能源整合与调度协同问题，强化互补互济运行策略研究。

附录 A

表 A1 购售电电价

Table A1 Electricity price for purchase and sale

时段	购电/(元/kWh)	售电/(元/kWh)
谷电价 01:00—07:00	0.38	0.22
谷电价 22:00—24:00	0.38	0.22
平电价 07:00—12:00	0.68	0.42
平电价 14:00—18:00	0.68	0.42
峰电价 12:00—14:00	1.20	0.65
峰电价 18:00—22:00	1.20	0.65

表 A2 各个方案的运行成本

Table A2 Operating costs of each program

方案	不同季节的运行成本			
	春季	夏季	秋季	冬季
1	6963.98	9726.08	11 228.23	9665.14
2	7150.12	10 055.88	11 710.48	9965.84
3	3965.41	5987.41	7459.77	6157.44
4	3979.05	6104.01	7583.17	6342.14
5	4180.93	7326.06	9450.28	7908.49
6	4344.41	7919.93	10 058.72	8548.34

表 A3 各个方案的环境成本

Table A3 Environmental costs of each program

方案	不同季节的环境成本			
	春季	夏季	秋季	冬季
1	1282.91	1801.14	2045.33	1736.98
2	1274.80	1805.83	2083.53	1743.89
3	1919.00	2359.73	2703.14	2388.26
4	1917.50	2400.26	2791.86	2395.22
5	1867.00	2431.24	2676.02	2333.60
6	1941.61	2509.54	2821.92	2423.34

参考文献

- [1] 洪仁彪, 张志明, 李树君. 发达国家乡村转型特征与中国乡村发展路径探索[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 359-366.
HONG Renbiao, ZHANG Zhongming, LI Shujun. Exploring the rural development path with Chinese characteristics considering rural transformation in developed countries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15): 359-366.
- [2] 付学谦, 杨菲菲, 周亚中, 等. 设施农业能源互联网智能预警理论: 评述与展望[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 24-33.
FU Xueqian, YANG Feifei, ZHOU Yazhong, et al. Intelligent early warning theory of the facility agricultural energy internet: review and prospect[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 24-33.
- [3] 王雯沁, 高红均, 王仁浚, 等. 考虑分布式电源支撑与农业设施协调的配电网分布鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 89-98.
WANG Wenqin, GAO Hongjun, WANG Renjun, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering coordination of distributed generator support and agricultural facilities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 89-98.
- [4] 陈维江, 靳晓凌, 吴鸣, 等. 双碳目标下我国配电网形态快速演进的思考[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6811-6818.
CHEN Weijiang, JIN Xiaoling, WU Ming, et al. Thinking on the rapid evolution of distribution network form under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6811-6818.
- [5] 刘洪波, 刘永发, 任阳, 等. 高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 260-272.
LIU Hongbo, LIU Yongfa, REN Yang, et al. Energy storage configuration considering the system wind power reserve capacity under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 260-272.
- [6] 王西胜, 刘辉, 刘迪, 等. 电网友好型风电场多功能电——氢混合储能系统容量配置[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 141-150.
WANG Xisheng, LIU Hui, LIU Di, et al. Capacity configuration of multi-functional electric-hydrogen hybrid energy storage system in grid-friendly wind farm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 141-150.
- [7] 李剑峰, 姜涛, 窦文雷, 等. 电-热-氢综合能源系统鲁棒区间优化调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 44-54.
LI Jianfeng, JIANG Tao, DOU Wenlei, et al. Robust interval optimal dispatch of integrated electricity and district heating system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 44-54.
- [8] 吕庆超, 李永发, 王长靖, 等. 燃煤电厂生物质掺烧比例测量方法研究进展[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16 [2024-10-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240471>
LÜ Qingchao, LI Yongfa, WANG Changjing, et al. Research progress on the measurement method of biomass blending ratio in coal-fired power plants[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-16[2024-10-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240471>
- [9] HOSSEIN A, PUDJIANTO D, STRBAC G, et al. The impact of hydrogen on decarbonisation and resilience in integrated energy systems[J]. Advances in Applied Energy, 2025, 17.
- [10] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热电优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 1-12.
CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 1-12.
- [11] 高玉, 王琦, 陈严, 等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 51-59.
GAO Yu, WANG Qi, CHEN Yan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system with hydrogen considering demand response and cascade energy utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 51-59.
- [12] QIU Y, LI Q, AI Y, et al. Two-stage distributionally robust optimization-based coordinated scheduling of integrated energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 542-555.
- [13] 李红伟, 吴佳航, 王佳怡, 等. 计及P2G及碳捕集的风光氢储综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 26-36.
LI Hongwei, WU Jiahang, WANG Jiayi, et al. Low-carbon economic dispatch of a wind, solar, and hydrogen storage integrated energy system considering P2G and carbon capture[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 26-36.
- [14] 艾平, 彭宇志, 金柯达, 等. 面向低碳村镇的可再生能源热电联供系统仿真与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 350-358, 99.
AI Ping, PENG Yuzhi, JIN Keda, et al. Simulation and optimization of renewable energy cogeneration system for low-carbon villages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S2): 350-358, 99.
- [15] 姜飞, 肖昌麟, 易子木, 等. 含光伏与生物质能的生态

- 农业综合能源系统多能协同及低碳运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1352-1364.
- JIANG Fei, XIAO Changlin, YI Zimu, et al. Multi-energy cooperation and low-carbon operation strategy of eco-agricultural integrated energy system containing photovoltaic and biomass energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1352-1364.
- [16] JIANG D, GAO H, HE S, et al. A negative-carbon planning method for agricultural rural industrial park integrated energy system considering biomass energy and modern agricultural facilities[J]. Journal of Cleaner Production, 2024: 143837.
- [17] ZHU M, AI X, FANG J, et al. Optimal scheduling of hydrogen energy hub for stable demand with uncertain photovoltaic and biomass[J]. Applied Energy, 2024, 360.
- [18] 梁樑, 吴杰. 数据包络分析(DEA)的交叉效率研究进展与展望[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(11): 941-947.
- LIANG Liang, WU Jie. A retrospective and perspective view on cross efficiency of data envelopment analysis (DEA)[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(11): 941-947.
- [19] 赵乐冰, 王蕾, 万灿, 等. 基于数据包络分析法的城市综合能源系统分环节能效评价[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 132-141.
- ZHAO Lebing, WANG Lei, WAN Can, et al. Segmented energy efficiency evaluation of urban integrated energy system based on data envelopment analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 132-141.
- [20] 陈旖旎, 胡盛红, 卢卫星, 等. 基于三阶段 DEA 的农业能源效率计算方法改进[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33(1): 153-165.
- CHEN Yini, HU Shenghong, LU Weixing, et al. Improvement of agricultural energy efficiency calculation method based on three-stage DEA[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 153-165.
- [21] 李金良, 刘怀东, 王睿卓, 等. 基于交叉超效率 CCR 模型的综合能源系统综合效率评价[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 78-86.
- LI Jinliang, LIU Huaidong, WANG Ruizhuo, et al. Comprehensive efficiency evaluation of integrated energy system based on cross-super-efficiency CCR model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 78-86.
- [22] SHU T H, LIAO X, SHUO Y, et al. Towards sustainability: evaluating energy efficiency with a super-efficiency SBM-DEA model across 168 economies[J]. Applied Energy, 2024, 376.
- [23] 戴前智, 王毅红, 谢启伟, 等. 基于非合作博弈两阶段 DEA 的能源环境效率评价方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(12): 3932-3946.
- DAI Qianzhi, WANG Yihong, XIE Qiwei, et al. Energy environmental efficiency evaluation method based on non-cooperative game two-stage DEA[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2024, 44(12): 3932-3946.
- [24] 王睿卓, 刘怀东, 崔丽瑶, 等. 计及综合效率评价的火-风-储-高载能企业虚拟电厂成员选择模型[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1942-1951.
- WANG Ruizhuo, LIU Huaidong, CUI Liyao, et al. Member selection model of thermal-wind-storage-EIE virtual power plant considering comprehensive efficiency evaluation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1942-1951.
- [25] 崔杨, 孙喜斌, 朱晗, 等. 考虑“燃煤+”耦合发电与灵活性资源备用的综合能源系统低碳经济调度[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2024-08-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241219>
- CUI Yang, SUN Xibin, ZHU Han, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering “Coal-fired +” coupling power generation and flexible resource reserve[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14 [2024-08-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241219>
- [26] 杨欢红, 周泽, 黄文焘, 等. 计及废物处理和甲醇合成的工业园区综合能源低碳经济运行策略[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4201-4210.
- YANG Huanhong, ZHOU Ze, HUANG Wentao, et al. Integrated energy low-carbon economic operation of industrial parks considering waste treatment and methanol synthesis[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4201-4210.
- [27] 付波, 方文俊, 李超顺, 等. 考虑垃圾焚烧烟气处理与电转甲醇的综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 112-126.
- FU Bo, FANG Wenjun, LI Chaoshun, et al. Optimal scheduling of an integrated energy system considering waste incineration flue gas treatment and power-to-methanol conversion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 112-126.
- [28] SHI Y, ZHAO Y, HUSSAIN A, et al. Comprehensive evaluation of rural regional integrated clean energy systems considering multi-subject interest coordination with pythagorean fuzzy information[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 138.

收稿日期: 2024-10-29; 修回日期: 2025-02-12

作者简介:

杨文新(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业电气化与自动化; E-mail: wenxinyang6699@163.com

杨旭海(1982—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为农业电气化与自动化。E-mail: yxh_513@shzu.edu.cn

(编辑 张颖)