

基于热解-沼气协同与碳绿耦合的农村多能源系统优化

谭文雄¹, 杨晓辉¹, 熊永康¹, 陈宜祎², 胡雄¹, 王志聪¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 南昌 330031; 2. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司, 南昌 330069)

摘要: 农村多能源系统(rural multi-energy system, RMES)能有效推动农村地区能源转型, 具有提高经济和环境效益的潜力。然而现有的农村能源系统未充分考虑能源设备的耦合使用, 也缺乏对市场政策影响的考量。提出了一种考虑热解和沼气池设备联合运行、阶梯碳交易(carbon emission trading, CET)与绿色证书交易(green certificate trading, GCT)耦合机制和全生命周期环境评估的低碳经济优化模型。首先, 建立了基于热解设备和沼气池联合的RMES运行框架, 明确了各能流和设备间的耦合关系。其次, 引入了碳-绿证耦合的市场交易机制, 借助市场调控作用提升可再生能源利用率。然后, 基于环境因素建立了系统全生命周期评估(life cycle assessment, LCA)过程, 量化了不同阶段的碳及标准污染物排放量并纳入模型优化体系。最后, 通过多场景算例对比分析, 结果表明该方法能够有效提高环境效益, 促进可再生能源消纳并提高系统的经济性。

关键词: 农村多能源系统; 生物质利用; 碳绿耦合; 全生命周期评估; 可再生能源消纳; 优化调度

Optimization of Rural Multi-Energy System Based on Synergistic Pyrolysis-Biogas Generation and Carbon Green Coupling

TAN Wenxiong¹, YANG Xiaohui¹, XIONG Yongkang¹, CHEN Yiyi², HU Xiong¹, WANG Zhicong¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Nanchang Power Supply Company of Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330069, China)

Abstract: The rural multi-energy system (RMES) can effectively advance the energy transition in rural areas and holds the potential to enhance economic and environmental benefits. Nevertheless, the existing rural energy systems fail to fully account for the coupled utilization of energy equipment and lack consideration of the impacts of market policies. This paper proposes a low-carbon economic optimization model that takes into account the combined operation of pyrolysis equipment and biogas digesters, the coupling mechanism of carbon emission trading (CET) and green certificate trading (GCT), as well as life-cycle environmental assessment. Firstly, an operation framework of RMES based on the joint operation of pyrolysis devices and biogas digesters is constructed to clarify the coupling relationships among various energy flows and equipments. Secondly, a coupled market trading mechanism integrating carbon and green certificates is introduced to raise the utilization rate of renewable energy via market regulation. Thirdly, a life cycle assessment (LCA) procedure for the system is established with environmental factors taken into consideration, which quantifies carbon emissions and standard pollutant discharges at different stages and incorporates these indicators into the model optimization system. Finally, comparative analysis is conducted through numerical examples under multiple scenarios. The results demonstrate that the proposed method can effectively boost environmental benefits, facilitate the consumption of renewable energy and improve the economic performance of the system.

Key words: rural multi-energy system; biomass utilization; carbon and green coupling; life cycle assessment; renewable energy consumption; optimal dispatching

0 引言

在乡村振兴战略的背景下实现低碳减排和提高可再生能源的利用尤为重要^[1-4]。随着农村能源革命战略的深入实施,乡村能源存在能效低、清洁能源占比少的突出问题,中国农村人均用能仅为城市的三分之一左右,农村基本生活用能仍大量使用秸秆和薪柴等传统能源,能源使用方式粗放,利用效率低,清洁、高效商品能源的使用比例很低。据数据显示,2018年清洁能源仅占农村能源消费总量的21.8%,乡村能源绿色转型迫在眉睫^[5-6]。相较于其他能源系统,农村地区太阳能、风能和生物质能等可再生能源更加丰富^[7],合理利用农村多能源系(rural multi-energy system, RMES)的资源既能有效缓解农村地区的能源供给问题,又能促进农村能源的低碳化和清洁化发展^[8],因此研究优化农村多能源系统架构,实现农村地区经济和环境效益的提升具有重要意义。

国内外关于生物质利用与农村能源系统的研究较为广泛,文献[9]构建了一种光-热-质协同能源系统,通过细化生物质气化过程参数优化系统配置与设备出力提升了系统经济性。文献[10]通过耦合生物质气化和太阳能参与系统运行,有效缓解了能源不足和碳排放量较高的问题。文献[11]建立了生物质燃气和电转气耦合模型,利用发酵提纯技术将生物质转化为燃气参与综合能源系统能流,解决了高碳排放问题。文献[12]构建了垃圾焚烧和厌氧发酵制沼气模型与多种能源转换设备协同实时系统的高效运行。上述研究主要聚焦于生物质制沼技术,然而在实际中存在利用单一、效率较低且控制精度低于生物质热(biomass pyrolysis, BP)过程的问题。文献[13]通过整合太阳能与生物质热解技术提升了农村地区的经济和环境效益。文献[14]基于乡村能源综合体模式引入热解气化技术并与其他能源品类及产业业态协同耦合,有效降低了环境污染程度。上述文献在生物质利用方面未能结合农村地区特点深入分析,且能源转换设备的选择较为单一,导致系统灵活性不足,有鉴于此,本文引入热解工艺与沼气池联合运行模式,旨在全方位提升农村能源系统的能源利用效率。

市场交易机制的引入对RMES的可持续发展有重要作用,我国引入的碳交易(carbon emission

trading, CE)和绿色证书交易(green certificate trading, GC)机制通过市场调节作用推动了能源转型^[15-16],然而现有关于绿证交易的研究多集中于城市和工业用户,文献[17]考虑在复合型矿区综合能源系统中引入碳绿证互认机制,利用市场交互促进了设备出力,从而提升了矿区可再生能源消纳率。文献[18]基于热电灵活输出设备耦合的含氢综合能源系统建立了碳交易(carbon emission trading, CET)和绿色证书交易(green certificate trading, GCT)作用下的优化模型,实现低碳经济运行。而农村地区拥有丰富的可再生资源,具备从传统能源消费者向产消者转变的基础,这一转变的实现离不开市场化机制的引导与激励,文献[19]以农业园区为背景构建农村虚拟电厂,综合考虑各类灵活能源交易之间的交互影响,通过市场激励引导系统优化资源配置。此外,现有研究提出多种市场交易之间的互动机制,文献[20]在CET-GCT联合机制与热电灵活运行模式的协同作用下,提升园区综合能源系统的可再生能源消纳水平,降低了碳排放量和成本。文献[21]在系统中考虑CET和GCT的互动并引入电动汽车参与分配碳配额与绿证配额,激励低碳行为,最终实现了虚拟电厂经济性、低碳性与灵活性的协同优化。然而上述研究中的市场交易机制未能因地制宜地结合农村能源系统特点,碳绿证交易机制在我国农村地区尚未开展规模化应用,农村分布式能源参与市场交易成本较高,在部分效益计算方面与实际情况存在偏差,本文基于RMES,结合碳绿耦合机制以准确计算相关成本和收益。

除了市场机制的调控作用,在系统内精确核算环境因子同样重要,因此引入全生命周期评(life cycle assessment, LCA)进行分析,LCA是基于能量视角,对产品体系全生命周期内环境影响进行评估的方法,在综合能源系统中用于对系统整个生命周期内的碳排放能流进行测算^[22-23],文献[24]基于电厂生命周期阶段和设备材料的碳排放对比分析LCA对系统优化配置的影响。文献[25]明确了综合能源系统全生命周期的评估范围与边界,通过4个阶段的排放清单量化不同阶段碳排放的影响程度。当前在农村相关领域的LCA研究多围绕碳足迹展开,在农村能源系统领域则多局限于单一生物质技术的碳排放足迹评价,缺少系统级全生命周期环境

评估与优化调度的融合。因此本文围绕生物质利用周期的污染物排放特性进行计量以准确量化LCA中的效益。

综上所述,本文提出了一种基于CET-GCT耦合机制和LCA的RMES优化方法。首先构建基于生物质利用的RMES运行框架,精细化热解设备和沼气池联合运行过程,明确各能流和能源转换设备关系;然后基于市场交易机制现状引入碳-绿证交易机制并将二者协同作用,同时避免在交易过程中双重计算以准确地量化成本和可再生能源利用率;其次以环境影响因素为基础引入LCA对不同阶段的碳和污染物排放进行量化,并加入系统优化模型;最后通过仿真验证了本文所提出方法的有效性。

1 农村多能源系统运行框架

1.1 系统基本结构

如图1所示为RMES运行框架,系统包含能源供给,转换设备和需求侧,其中供给侧有风机(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic, PV)、集热器(solar collector, SC)和生物质,转换设备包括燃气锅炉(gas boiler, GB)、微型燃气轮机(micro turbine, GT)、热电联产(combined heat and power, CHP)、生物质热解-沼气池(biomass pyrolysis-biogas digester, BP-BD)、电制冷机(electric chiller, EC)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、储电(electricity storage, ES)、储热(heat storage, HS)、储冷(cold storage, CS)和储气(gas storage, GS),需求侧为4种类型的能源负荷。

1.2 生物质热解设备和沼气池模型

生物质热解和沼气池协同运行模式能够有效提

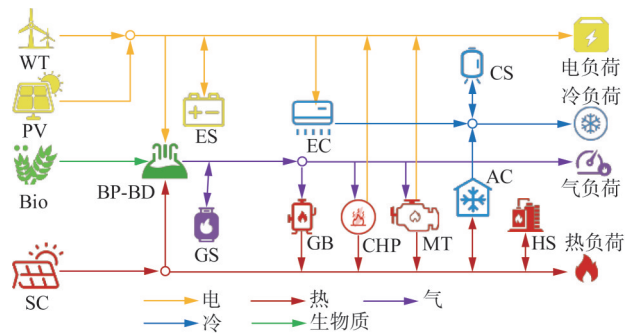


图1 RMES运行框架

Fig. 1 Operation framework of RMES

高生物质的利用效率。生物质热解是规模化制备生物质能源的有效途径,在该模式下生物质原料首先输入热解设备中气化分解以产生生物质气供系统使用,然后剩余的废渣加入沼气池中,沼气池可依托周边农田等形成生态消纳体系,通过发酵产生气体进一步供能,运行过程如图2所示。

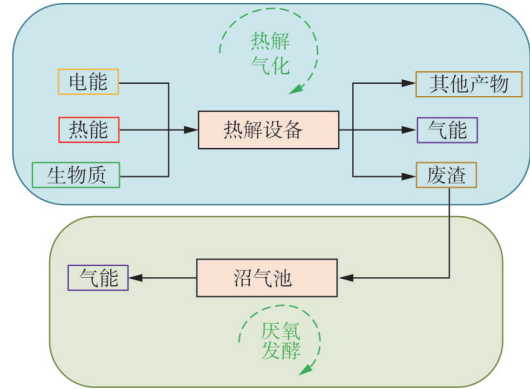


图2 BP-BD联合运行过程

Fig. 2 Joint operation process of BP-BD

1.2.1 生物质热解设备建模

生物质热解设备通过热化学反应对干燥或粉碎的生物质进行预处理,在热解条件下生成生物质气体,可直接用于能源转化。根据不同的热解工艺,其产气性能存在差异:如常规无氧热解工艺的生物质气热值可达3 800~4 800 Cal,产气率约为0.35 m³/kg;规模化干馏制气设备的产气量可达250 m³/h,生物质燃气低位发热量>14 MJ/m³;当闪速热解温度高于700 ℃时,气体产物产率可达80%(质量分数)。相关建模如下所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{BP}} = \alpha_{\text{BP}} M_t^{\text{bio}} \\ H_t^{\text{BP}} = \beta_{\text{BP}} M_t^{\text{bio}} \\ G_t^{\text{gas}} = \frac{\alpha_{\text{gas}} L_{\text{bio}} M_t^{\text{bio}}}{L_{\text{gas}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_t^{BP} 、 H_t^{BP} 、 α_{BP} 、 β_{BP} 分别为热解设备消耗的电、热能、电能耗系数和热能耗系数; M_t^{bio} 、 L_{bio} 分别为生物质质量和热值; G_t^{gas} 、 α_{gas} 、 L_{gas} 分别为产生的气能、产气效率和气体低位热值。

1.2.2 沼气池建模

沼气池的核心环节为厌氧消化,即借助厌氧微生物在无氧环境下分解生物质产生沼气,进而参与系统能量循环;本文采用中温厌氧发酵工艺,利用热解剩余废渣制取沼气,模型如下所示^[26]。

$$V_t^{\text{gas}} = \frac{M_{\text{gas}} P_0 C_0 V_{\text{BD}}}{24 V_m \delta} \left[1 - \frac{K}{K + \delta(0.013 T - 0.129) - 1} \right] \Delta t \quad (2)$$

式中: V_t^{gas} 为沼气池产气体积; M_{gas} 为沼气分子量; P_0 、 C_0 分别为生化甲烷潜力和底料浓度; V_{BD} 为沼气池体积; V_m 为气体摩尔体积; δ 为滞留时间; K 为动力学参数; T 为底料温度; Δt 为时间间隔。

2 碳-绿证耦合交易机制

2.1 阶梯碳交易机制

阶梯碳交易机制在传统碳交易基础上引入了分段配额与差别定价机制,通过对高排放强度施加价格压力以促使系统降低碳排放,在碳市场交易中系统会得到一部分配额,再由实际碳排放量作差计算得到系统参与 CET 的量,有关计算公式如下。

$$E_t^{\text{RMES}} = E_t^a - E_t^q \quad (3)$$

$$C_{\text{CO}_2} = \begin{cases} \xi E_t^{\text{RMES}}, E_t^{\text{RMES}} \leq L \\ \xi L + \xi(1 + \psi)(E_t^{\text{RMES}} - L), L \leq E_t^{\text{RMES}} \leq 2L \\ \xi(2 + \psi)L + \xi(1 + 2\psi)(E_t^{\text{RMES}} - 2L), 2L \leq E_t^{\text{RMES}} \leq 3L \\ \xi(3 + 3\psi)L + \xi(1 + 3\psi)(E_t^{\text{RMES}} - 3L), 3L \leq E_t^{\text{RMES}} \leq 4L \\ \xi(4 + 6\psi)L + \xi(1 + 4\psi)(E_t^{\text{RMES}} - 4L), E_t^{\text{RMES}} \geq 4L \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_t^a 、 E_t^q 、 E_t^{RMES} 分别为实际的碳排放量、系统的碳配额和参与碳交易的碳排放量; C_{CO_2} 为碳成本; ξ 为阶梯碳交易基础价格; ψ 为价格上升速率; L 为碳量区间间隔长度。

2.2 绿证交易机制

绿色电力证书是可再生能源发电的凭证,系统通过可再生能源发电获取绿证并参与市场交易,在市场影响下能够促进绿色电力使用和可再生能源的发展^[27],当系统获得的绿证数量未达到规定配额时则会通过购买来弥补,而当绿证数超数量配额时则可以出售以获得经济效益,关于 GCT 的计算公式如下。

$$\begin{cases} G_a = \sum_{t=1}^T \mu_{\text{gr}} (P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{WT}}) \Delta t \\ G_q = \sum_{t=1}^T \nu_{\text{gr}} P_t^{\text{load}} \Delta t \\ C_{\text{GCT}} = o_{\text{gr}} (G_a - G_q) \end{cases} \quad (5)$$

式中: G_a 、 G_q 分别为实际获得的绿证数和配额的绿证数; P_t^{PV} 、 P_t^{WT} 、 P_t^{load} 分别为 t 时刻的光伏出力、风机出力和电负荷功率; μ_{gr} 、 ν_{gr} 、 o_{gr} 分别为可再生能

源发电量的绿证转换系数、配额绿证转换系数和绿证单价; C_{GCT} 为绿色证书交易成本; T 为调度周期; Δt 为单位调度时段。

2.3 碳-绿证耦合机制

图 3 为碳交易和绿证耦合机制。传统市场交易中通常存在碳减排量重复计算问题,本文考虑的 CET-GCT 耦合机制通过计算可再生能源生命周期碳排放量差值得到实际绿证避免的碳减排量^[28],该计算需覆盖可再生能源生产、传输、使用全生命周期环节:生产阶段核算设备制造、安装维护等间接碳排放,传输阶段依据电网损耗率和平均排放因子计算损耗碳排放,使用阶段以绿电使用量乘以电网排放因子核算减排量,同时结合不同区域电网排放因子差异进行调整,计算公式如下。

$$\begin{cases} E_d = \frac{\eta_{\text{gr}} [\varpi_{\text{gr}} (P_t^{\text{EC}} + P_t^{\text{load}}) - (P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{WT}})]}{\varpi_{\text{qua}}} \\ E_t^{\text{total}} = E_t^{\text{RMES}} - E_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_d 、 E_t^{total} 分别为重复计算的碳排放量和系统最终参与碳市场交易的碳排放量; η_{gr} 为重复减排因子; ϖ_{gr} 、 ϖ_{qua} 分别为绿电比例系数和绿证量化系数; P_t^{EC} 为电制冷机消耗的电能。

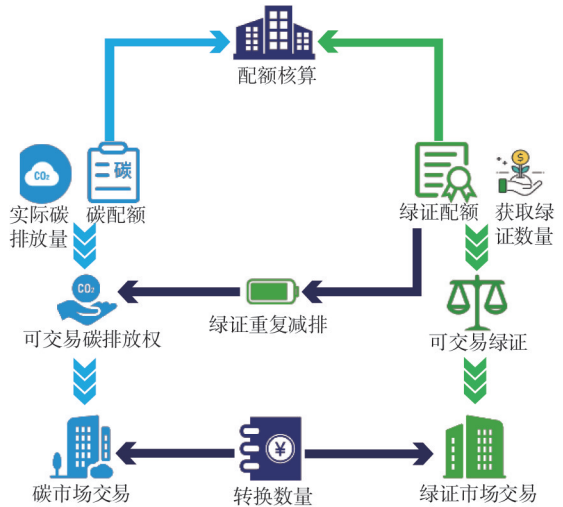


图 3 碳交易-绿证耦合机制

Fig. 3 CET-GCT coupling mechanism

3 基于碳绿耦合机制和 LCA 环境因子约束的 RMES 低碳经济调度

3.1 LCA 碳排放

LCA 是一种自下而上的评估方法,可用于核算

综合能源系统整个生命周期阶段所产生的环境影响^[29], 本文基于 RMES 在不同全生命周期阶段所包含的碳及污染物排放进行核算, 主要包括设备获取, 能源转换和运输使用过程。设备获取阶段的碳排放主要包括 3 部分: 生物质原料收集和机械设备使用, 光伏和风机设备的建设以及 RMES 其他组件建造。其 LCA 碳排放计算公式如下。

$$\begin{cases} S_c = \sum_i \gamma_i E_{oil} / L_{oil} \\ S_r = \sum_i (B_i^{bui} / H_i^{bui} + k_i^{loss} B_i^{pro} / H_i^{pro}) / P_{re} \\ S_b = I_{dep} C_{dep} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_c 、 S_r 、 S_b 分别为原料获取、可再生能源设备和能源转换与存储设备建造的生命周期碳排放量; γ_i 为获取阶段中第 i 个阶段的能耗系数; E_{oil} 、 L_{oil} 分别为柴油能耗系数和热值; B_i^{bui} 、 H_i^{bui} 分别为建设阶段第 i 类材料碳排放强度和内含强度; k_i^{loss} 、 B_i^{pro} 、 H_i^{pro} 分别为生产阶段第 i 类材料损耗系数、碳排放强度和内含强度; P_{re} 为周期内可再生能源发电量; I_{dep} 、 C_{dep} 分别为建造碳排放强度和折旧成本。

在能源转换过程中一方面储能设备在使用阶段和废弃物回收处理存在大量碳排放, 故对于储能设备的生命周期过程的碳排放系数核算, 由于储能种类差异较大, 综合确定为 $0.091\ 33\ \text{kg/kWh}$ ^[30], 另一方面根据世界核能协会对相关研究的综述, 生物质发电的全生命周期排放强度中值为 $45\ \text{g/kWh}$, 其生长过程中吸收的二氧化碳可抵消大部分燃烧产生的碳排放, 因此只需计算其他设备运维的排放^[31]。运输使用过程中包括运输生物质的车辆燃料消耗和原料热解产生的生物炭的固碳减排效果, 有关计算公式如下。

$$S_{tr} = \frac{2k_{oil}\rho_{oil}E_{oil}D_{dis}}{V_{car}} \quad (8)$$

式中: S_{tr} 为运输阶段生命周期碳排放量; k_{oil} 、 ρ_{oil} 分别为柴油消耗系数和密度; D_{dis} 为运输距离; V_{car} 为车容量。

3.2 LCA 污染物排放

在设备获取, 能源转换和运输使用 3 个环节中, 基于 LCA 方法核算几种典型污染物排放使得系统的经济性评估更加全面, 本文研究中选择 NO_x 、 SO_2 和 PM_{10} 为典型标准污染物定量衡量在不同阶段所产生的排放量, 同时引入电力行业污染物惩罚标准加入系统经济性研究, NO_x 、 SO_2 和 PM_{10} 的单位惩罚

成本参数分别为 $1.691\ 9$ 元、 $0.809\ 9$ 元和 $0.009\ 6$ 元^[32], 相关污染物排放系数如表 1 所示。

表 1 生命周期阶段污染物排放系数

Tab. 1 Emission coefficients of pollutants in life cycle stages

阶段过程	污染物系数		
	NO_x	SO_2	PM_{10}
设备获取/($\text{g} \cdot (\text{N}^{-1} \text{m}^{-3})$)	1.24	0.62	
能源转换/($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)	0.000 09	0.057 6	
运输使用/($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)	0.016	0.041	

3.3 RMES 优化调度模型

3.3.1 目标函数

本文构建基于碳绿耦合机制和 LCA 环境因子约束的 RMES 优化模型, 以最小化 RMES 的总成本为优化目标, 其中总成本包括生物质利用成本、运维成本、弃能成本、环境成本和碳绿证交易成本, 计算如下。

$$\begin{cases} \min y = C_{\text{CO}_2} + C_{\text{GCT}} + C_{\text{bio}} + C_{\text{ope}} + C_{\text{dis}} + C_{\text{en}} \\ C_{\text{bio}} = \sum_{t=1}^T u_{\text{bio}} M_t^{\text{bio}} \\ C_{\text{ope}} = \sum_{t=1}^T u_{\text{dc}} P_t^{\text{dc}} \\ C_{\text{dis}} = \sum_{t=1}^T [q_w (P_t^{\text{WT}, \max} - P_t^{\text{WT}}) + q_p (P_t^{\text{PV}, \max} - P_t^{\text{PV}})] \\ C_{\text{en}} = \sum_{t=1}^T (u_p M_t^p + u_s M_t^s + u_n M_t^n) \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_{bio} 、 C_{ope} 、 C_{dis} 、 C_{en} 分别为系统的生物质利用成本、运维成本、弃能成本和环境成本; u_{bio} 、 u_{dc} 分别为生物质成本系数和设备运维系数; P_t^{dc} 、 $P_t^{\text{WT}, \max}$ 、 $P_t^{\text{PV}, \max}$ 分别为设备运行功率、风机最大运行功率和光伏最大运行功率; q_w 、 q_p 分别为弃风和弃光成本系数; u_p 、 u_s 、 u_n 分别为 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 的惩罚系数; M_t^p 、 M_t^s 、 M_t^n 分别为 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 的排放量。

3.3.2 约束条件

风机与光伏出力约束如下。

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{WT}} \leq P_t^{\text{WT}, \max} \\ 0 \leq P_t^{\text{PV}} \leq P_t^{\text{PV}, \max} \end{cases} \quad (10)$$

电制冷机和吸收式制冷机运行约束如下。

$$\begin{cases} U_t^{\text{EC}} = \eta_{\text{EC}} P_t^{\text{EC}} \\ U_t^{\text{AC}} = \eta_{\text{AC}} H_t^{\text{AC}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_t^{AC} 、 U_t^{EC} 分别为 AC 输出冷功率、EC 消耗热功率; H_t^{AC} 为 AC 消耗热功率; η_{AC} 、 η_{EC} 分别为 AC 和 EC 的效率。

热电联产运行约束如下。

$$\begin{cases} P_t^{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP,e}} G_t^{\text{CHP}} \\ H_t^{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP,h}} G_t^{\text{CHP}} \\ G_t^{\text{CHP,min}} \leq G_t^{\text{CHP}} \leq G_t^{\text{CHP,max}} \\ \phi_{\text{CHP,min}} \leq H_t^{\text{CHP}}/P_t^{\text{CHP}} \leq \phi_{\text{CHP,max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_t^{CHP} 、 H_t^{CHP} 、 G_t^{CHP} 分别为 CHP 输出电功率、输出热功率和消耗气功率; $\eta_{\text{CHP,e}}$ 、 $\eta_{\text{CHP,h}}$ 分别为 CHP 的电和热转换效率; $G_t^{\text{CHP,min}}$ 、 $G_t^{\text{CHP,max}}$ 分别为 CHP 耗气最小和最大功率; $\phi_{\text{CHP,min}}$ 、 $\phi_{\text{CHP,max}}$ 分别为 CHP 热电比最小和最大值。

系统设备爬坡功率约束如下。

$$\begin{cases} \Delta G_{\text{CHP,min}} \leq G_{t+1}^{\text{CHP}} - G_t^{\text{CHP}} \leq \Delta G_{\text{CHP,max}} \\ \Delta G_{\text{MT,min}} \leq G_{t+1}^{\text{MT}} - G_t^{\text{MT}} \leq \Delta G_{\text{MT,max}} \\ \Delta G_{\text{GB,min}} \leq G_{t+1}^{\text{GB}} - G_t^{\text{GB}} \leq \Delta G_{\text{GB,max}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\Delta G_{\text{CHP,min}}$ 、 $\Delta G_{\text{CHP,max}}$ 分别为 CHP 爬坡下限和上限; $\Delta G_{\text{MT,min}}$ 、 $\Delta G_{\text{MT,max}}$ 分别为 MT 爬坡下限和上限; $\Delta G_{\text{GB,min}}$ 、 $\Delta G_{\text{GB,max}}$ 分别为 GB 爬坡下限和上限; G_t^{MT} 、 G_t^{GB} 分别为 MT 和 GB 的耗气功率。

系统的功率平衡约束如下。

$$\begin{cases} P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{CHP}} + P_t^{\text{MT}} + P_t^{\text{ES,dis}} = \\ P_t^{\text{EC}} + P_t^{\text{BP}} + P_t^{\text{ES,cha}} + P_t^{\text{load}} \\ H_t^{\text{GB}} + H_t^{\text{CHP}} + H_t^{\text{MT}} + H_t^{\text{ES,dis}} = \\ H_t^{\text{BP}} + H_t^{\text{AC}} + H_t^{\text{ES,cha}} + H_t^{\text{load}} \\ U_t^{\text{AC}} + U_t^{\text{EC}} + U_t^{\text{ES,dis}} = U_t^{\text{ES,cha}} + U_t^{\text{load}} \\ G_t^{\text{gas}} + V_t^{\text{gas}} + G_t^{\text{ES,dis}} = \\ G_t^{\text{GB}} + G_t^{\text{CHP}} + G_t^{\text{MT}} + G_t^{\text{ES,cha}} + G_t^{\text{load}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_t^{MT} 、 $P_t^{\text{ES,dis}}$ 、 $P_t^{\text{ES,cha}}$ 分别为 MT 输出电功率、储能放电和充电功率; H_t^{GB} 、 H_t^{MT} 、 $H_t^{\text{ES,dis}}$ 、 $H_t^{\text{ES,cha}}$ 、 H_t^{load} 分别为 GB 输出热功率、MT 输出热功率、储能放热、储能充热和热负荷; $U_t^{\text{ES,dis}}$ 、 $U_t^{\text{ES,cha}}$ 、 U_t^{load} 分别为储能放冷、储能充冷和冷负荷; G_t^{GB} 、 G_t^{MT} 、 $G_t^{\text{ES,dis}}$ 、 $G_t^{\text{ES,cha}}$ 、 G_t^{load} 分别为 GB 消耗气功率、MT 消耗气功率、储能放气、储能充气和气负荷。

系统的储能设备约束如下。

$$\begin{cases} E_{j,t} = E_{j,t-1} + (E_{j,t}^{\text{cha}} \eta_j^{\text{cha}} - E_{j,t}^{\text{dis}} / \eta_j^{\text{dis}}) \Delta t \\ K_j^1 = K_j^{24} \\ K_{\min} \leq K_t \leq K_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{j,t}$ 、 $E_{j,t}^{\text{cha}}$ 、 $E_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为第 j 种储能设备在 t 时

段的输出功率, 第 j 种储能设备在 t 时段的充能和放能功率; η_j^{cha} 、 η_j^{dis} 分别为第 j 种储能设备充能和放能效率; K_j^1 、 K_j^{24} 分别为周期内初始和结束的储能容量; K_t 、 $K_{\min}$ 、 $K_{\max}$ 分别为 t 时段的容量, 容量下限和容量上限。

生物质相关约束如下:

$$\begin{cases} M_t^{\text{bio}} = M_t^{\text{pro}} + M_t^{\text{rem}} \\ F_t^{\text{bio}} = F_t^{\text{pro}} + F_t^{\text{rem}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: M_t^{pro} 、 F_t^{pro} 分别为副产物质量和热值; M_t^{rem} 、 F_t^{rem} 分别为残余物质量和热值; F_t^{bio} 为生物质热值。

3.4 模型求解

本文所构建的农村多能源系统优化模型中存在多种能源转换设备, 其中包括非线性约束, 因此通过 MATLAB R2023a 软件中的 YALMIP 工具箱和 GUROBI 商业求解器处理该混合整数非线性优化模型。

4 算例分析

4.1 算例参数和场景设置

本文以中国中部某农村示范区为研究对象开展研究与仿真分析, 系统内典型负荷、风机及光伏出力的预测曲线如图 4 所示, 各参数取值详见表 2。

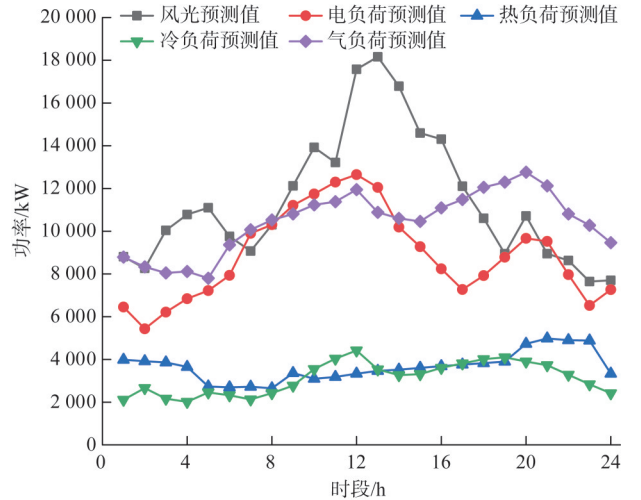


图 4 可再生能源出力功率和负荷预测曲线

Fig. 4 Prediction curves of renewable energy output power and load

为了验证本文所提出的 RMES 模型优化调度策略的低碳经济性, 参考多场景分析在乡村综合能源系统优化调度中的应用思路, 设置以下 6 种调度场景, 各场景方案如表 3 所示, 其中场景 1 是传统农

表 2 各参数数值

Tab. 2 Values of each parameter	
参数	数值
$\alpha_{BP}/(\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1})$	240
$\beta_{BP}/(\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1})$	628
α_{gas}	0.255
$L_{\text{bio}}/(\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1})$	17 000
$L_{\text{gas}}/(\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3})$	9.58
$P_0/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.45
K	1
$T/(\text{℃})$	30
$\xi/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	250
$\mu_{\text{gr}}/(\text{本} \cdot \text{kWh}^{-1})$	1
ϖ_{gr}	0.2
$L_{\text{oil}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	44
$\rho_{\text{oil}}/(\text{kg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.84
$k_{\text{oil}}/(\text{L} \cdot \text{km}^{-1})$	0.213

村能源系统模型, 仅考虑生物质高温热解气化转换; 场景 2 基于场景 1 加入了 CET-GCT 耦合机制; 场景 3 考虑 BP-BD 联合运行; 场景 4 在场景 3 的基础上仅加入阶梯 CET 交易机制; 场景 5 在场景 3 的基础上仅引入 GCT 交易机制; 场景 6 为本文提出的优化运行策略, 在考虑 BP-BD 联合运行下同时考虑 CET-GCT 耦合的交易机制。

表 3 不同场景方案信息

Tab. 3 Information on different scenario plans			
场景序号	BP-BD 联合运行	CET 机制	GCT 机制
1	×	×	×
2	×	√	√
3	√	×	×
4	√	√	×
5	√	×	√
6	√	√	√

4.2 不同场景下的优化结果与分析

场景 1—场景 6 的优化调度结果如表 4 所示。

4.2.1 BP-BD 联合运行分析

如图 5 所示是场景 6 下的各设备电功率供需平衡结果, 可以看出该场景中热解设备出力较为稳定, 且全时段电能需求波动较小, 在电负荷需求较低的 0—4 和 22—00 时段, 系统的可再生能源发电和 CHP 设备提供电能需求, 当系统的电能消耗处于较大如 6—10 时段, 此时可再生能源、CHP、MT

表 4 不同场景的优化调度结果对比

Tab. 4 Comparison of optimization scheduling results in different scenarios						
参数	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6
碳排放量/kg	183 767.0	162 628.3	172 531.4	156 801.8	156 632.2	153 171.3
弃风光率/%	13.5	8.4	10.9	10.5	5.9	3.1
CET 成本/元	55 130.1	49 825.2	51 759.4	47 656.0	46 989.6	46 189.7
GCT 成本/元	0	-20 853.8	0	0	-21 527.3	-22 283.6
综合成本/元	25 712.2	27 557.0	25 617.5	26 718.1	27 908.3	26 635.1
总成本/元	80 842.3	56 528.4	77 376.9	74 374.1	53 370.6	50 541.2

和储能都将出力以满足系统消耗电能的需求, 在 12—15 时段, 系统可再生能源出力较大, 在 GCT 机制促进下会尽可能充分利用风光出力, 但由于 CHP 和 MT 均为热电耦合设备, 在热能需求下会影响其出力情况, 此时无法消纳所有可再生能源, 在衡量收益和成本下系统选择弃置可再生能源。

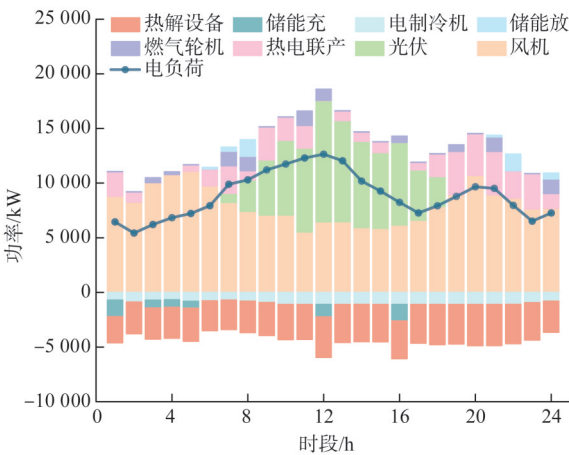


图 5 场景 6 电功率能量平衡图

Fig. 5 Power energy balance diagram of scenario 6

场景 6 的热功率供需平衡图如图 6 所示, 在有时段均有 GB 出力, 一方面由于 CHP 和 MT 的热电特性使其产热功率受到制约, 另一方面, 综合考量系统整体收益与成本后, 会更多采用 GB 出力以满足热能需求, 在 1—5 时段热负荷需求较低, GB 出力能够提供 89.37 % 的热能, 在热能相对富余的 10—13 和 16—21 时段, SC 提供了部分热能, 系统会提供部分热能满足 AC 需求; 该场景下的系统在

CET机制作用下,为了降低高碳排放量的成本惩罚,在一些时段除GB外仅会有单一的CHP或MT机组出力,这也是受到综合经济性以及其他能量平衡制约的结果。

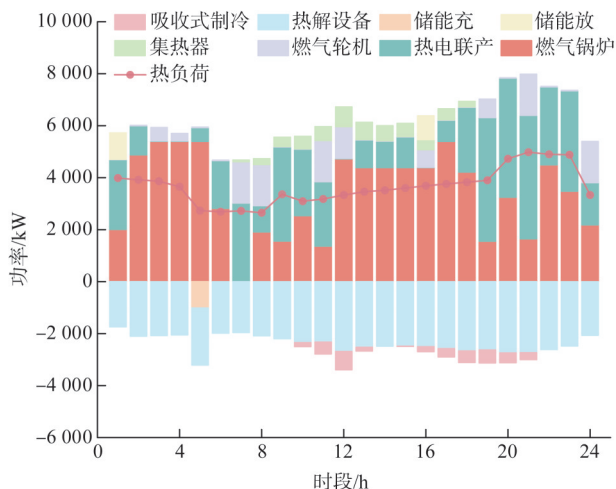


图6 场景6热功率能量平衡图

Fig. 6 Thermal power energies balance diagram of scenario 6

如图7所示是场景6的气功率平衡图,在3—5和13—17时段由于热能的需求较高,GB消耗的气能达到上限,在19—22时段,为同时满足电和热负荷需求,系统主要以CHP机组出力主,其耗气量占比达到54.45%,在此场景下RMES的BP-BD所产生的气能用于供给其他耗气设备和气负荷,在所有时段下生物质热分解产气过程均占主导作用,厌氧制沼过程对系统的气功率供应起到一定补充,通过废渣利用环节(属于生物质利用范畴)能降低系统的碳排放量从而减少在CET作用下的碳排放成本,据东吴证券测算,生物质利用属于CCER自愿减排鼓励类型,具备明确的减碳经济效益。

由表4可知,相较于场景2,场景6在碳绿耦合的交易机制上引入了BP-BD联合运行方式,碳排放量降低了9 457.0 kg,总成本减少了6 124.8元,这是因为废渣利用过程可为系统补充沼气供应,而单一的BP运行模式下沼气仅通过生物质热解制取,系统会消耗更多的生物质以满足气能需求。根据碳计算的直接排放计算方法,直接排放量=活动数据×排放因子×氧化率,消耗更多的生物质意味着活动数据增加,对应产生的二氧化碳排放增多。同时,参考碳排放核算规则,生物源碳仅参与大气循环,不纳入碳排放清单,但其作为燃料消耗时,若系统

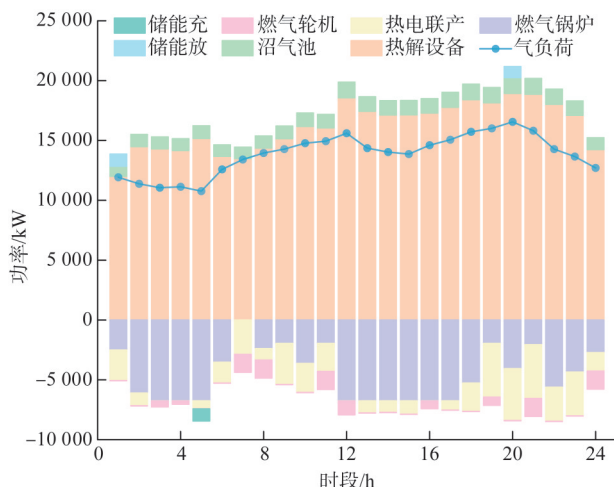


图7 场景6气功率能量平衡图

Fig. 7 Gas power energies balance diagram of scenario 6

消耗更多生物质来满足需求,会挤占原本可作为减排项的生物质利用路径,因此在碳排放的LCA过程中实际核算的碳排放量增多,从而成本增加,所以场景6对比场景2的优化效果有所提升。

4.2.2 CET-GCT耦合效应分析

由表4可知,在仅考虑单一的BP运行情况下,场景2相较于场景1引入了碳-绿证耦合交易机制,其中碳排放量减少了11.50%,可再生能源弃置率降低了5.1%,这表明,在传统生物质热解气化系统中引入CET-GCT耦合机制能够有效实现降碳并促进风光消纳。

场景4和场景5对比于场景3的碳排放量降低了9.12%和9.22%,说明只考虑单一的CET或GCT机制也会对系统起到减排效果,一方面是阶梯价格中的高成本促使系统抑制碳排放,另一方面是在绿证机制的激励下,系统会更多地使用绿色清洁能源获取更多的利益,从而减少了其他能源设备的使用,产生更低的碳量。

场景6较于场景4和场景5的各项效益有进一步提升,系统的碳量减少了3 630.5 kg和3 460.9 kg,这表明碳绿耦合的机制能再次提高减碳能力,相较于之前的场景比较下的提升效果有限是由于系统各设备运行和能源需求达到较高稳定状态,同时CET-GCT耦合机制避免了碳排放量的遗漏计算使得结果更加准确;系统的弃能率减少了7.4%和2.8%,在双重机制激励下,系统为获取更多的绿证而提升风光能源消纳水平,从而降低整个系统的成本。相关研究显示,综合能源系统(IES)同时参

与CET、GCT市场和绿碳抵消机制时,碳排放成本将降低48.40%,GCT的收入仅减少7.25%,也进一步印证了这类耦合机制在降本减碳上的显著作用。

在6种不同场景下的可再生能源弃置量如图8所示,系统弃置风机与光伏发电的时段主要集中在1—5和12—18,这两个时段的可再生能源出力相较于用电负荷和设备消耗需求较高,由于系统内能源耦合设备关联性强,进一步增加风光发电消纳可能影响其他机组的出力状况,从而使系统的综合成本发生变化,系统在经济性的权衡下会选择弃置可再生能源。在考虑GCT机制的情形下,场景5相较于场景3的可再生能源消纳提升,在主要弃能的两个时段,系统相对减少CHP和MT设备出力以降低电能的供给,从而得以更多使用绿色电力,虽然综合成本提高了2 290.8元,但系统通过GCT交易获得的收益更多,因此能够降低弃风光率。在考虑碳绿耦合交易机制的场景2和场景6中,场景6为BP-BD联合运行模式,该场景下的1—5和12—18时段系统通过废渣制沼补足气能主要供给GB使用以满足系统热需求从而减少CHP出力,同时配合储能使系统在1—5时段风光全部消纳,在12—18时段风光出力较大,在满足其他能量平衡基础上很难再利用大量风光发电,综合考虑CET-GCT耦合交易机制下的收益和成本后也会在该时段舍弃部分可再生能源出力。

4.2.3 LCA碳和污染物排放分析

图9所示为各个场景下在不同时段的碳排放

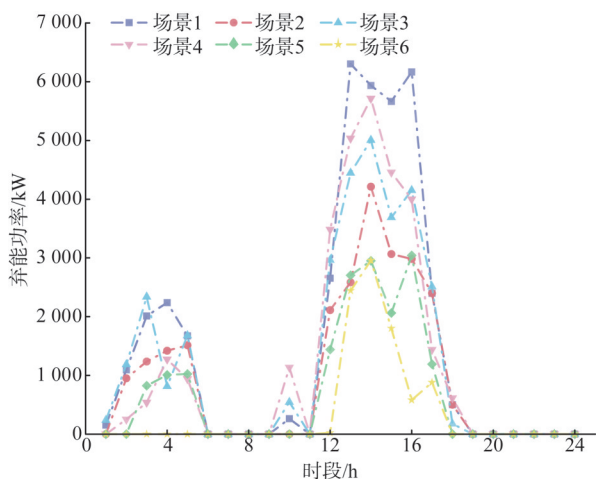


图8 不同场景下的弃能功率

Fig. 8 Energy power for disposal in different scenarios

量,可以看出场景1和场景3在大部分时段的碳排放量高于其他场景,这是由于没有考虑交易机制使得系统缺少高额碳排放量带来的惩罚,在10:00—12:00和17:00—23:00时段系统的负荷需求量上升,场景6对比于场景2考虑了BP-BD联合运行,在这两个时段下系统通过减少生物质的使用量和调节各个能源转换机组出力情况,分别降低了1 373.3 kg和3 864.2 kg碳排放量;场景6在场景3的基础上加入了CET-GCT耦合机制,当每个时段的碳排放量较高时,处于阶梯较高的部分有更高的单位排放成本,因此场景6在17:00—23:00的时段减少了LCA过程中碳排放相对较多的GB使用而更多地利用CHP机组,最终平均每个时段碳排放量降低了1 142.1 kg。

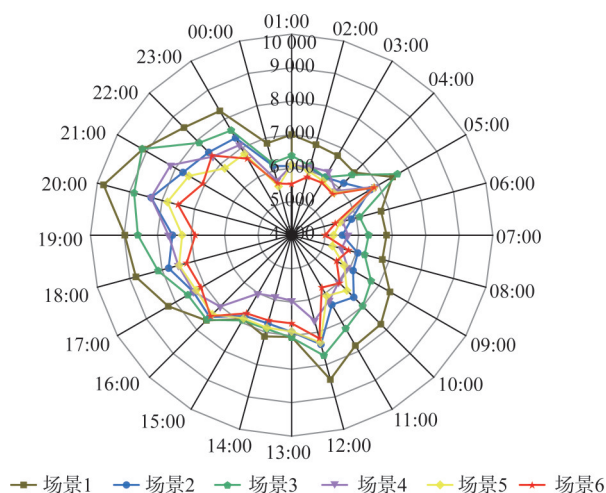


图9 不同场景的碳排放量

Fig. 9 Carbon emissions in different scenarios

如图10展示了系统在全生命周期各阶段3种标准污染物的排放占比,可以看出在能源转换阶段PM10的排放占主导部分,这一阶段的污染物主要是机组设备的出力产生;设备获取阶段包括设备建设和生产两部分,其中NO的排放量平均占比超过70%,而相关研究显示木质、棉秆和玉米秸秆3种固体生物质成型燃料燃烧时NO排放量均在0.05%以下;在运输使用阶段为处理生物质的过程,同时也是全阶段中NO_x排放比例最高的过程,而火电厂作为NO_x主要污染源之一,其相关排放控制技术也为生物质处理阶段的NO_x管控提供了参考方向。

由图11可知,相较于场景3,场景6的标准污染物排放占比中NO_x和PM10的比例由77.81%和

11.32 % 降低至 72.70 % 和 9.21 %， SO_2 占比从 10.87 % 提高到 18.09 %，这是因为在引入 CET 和 GCT 交易机制后，系统为了降低碳交易成本和充分利用可再生能源出力会进一步对碳排放量进行限制，由于全生命周期内碳排放量与生物质使用相关性较高，系统会调整 BP-BD 联合运行中的生物质使用量与设备出力，而污染物排放量与这两项因素关联性较强，进而影响了系统标准污染物的排放比例；场景 6 对比于场景 2，由于利用废渣厌氧制沼弥补了一定的沼气量，系统的设备获取阶段排放量降低，而在该过程中排放的主要为 NO_x ，因此生物质消耗减少带来 NO_x 排放占比降低，但由于整个系统运行中 BP 的出力相对较少，最终 NO_x 的排放降低幅度为 2.46 %， PM_{10} 占比提高了 3.75 %， SO_2 降幅为 9.60 %。

在排放成本方面，场景 6 的污染物惩罚成本为 389.2 元，较场景 3 的 436.4 元降低了 10.8 %，这是因为在生命周期各个阶段中的 NO_x 平均占比较高，同时在 3 种污染物的环境惩罚金额中单位质量排放成本达到 67.37 %，因此 NO_x 的排放量降低能够有效地降低污染物排放成本，对比于场景 2 的价格降幅达到 6.7 %，这表明 CET-GCT 耦合机制能有效控制污染物的排放，同时引入 BD-BP 联合运行相较单一的生物质热分解系统在污染物排放方面也起到一定优化作用。

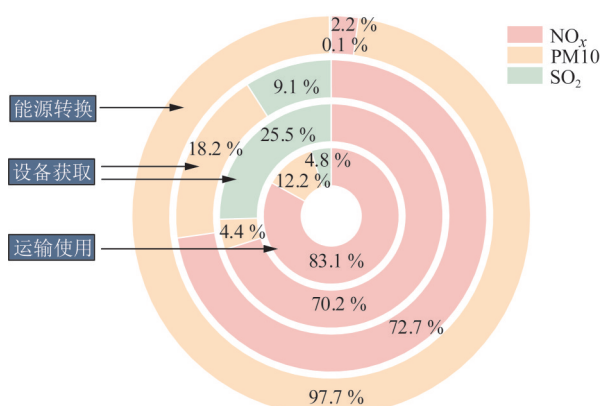


图 10 不同阶段标准污染物排放比例

Fig. 10 Proportion of standard pollutant emissions at different stage

4.2.4 碳-绿证价格灵敏性分析

在实际中碳绿证交易市场的价格波动会对系统优化结果产生显著影响，以碳价为例，其变动将直

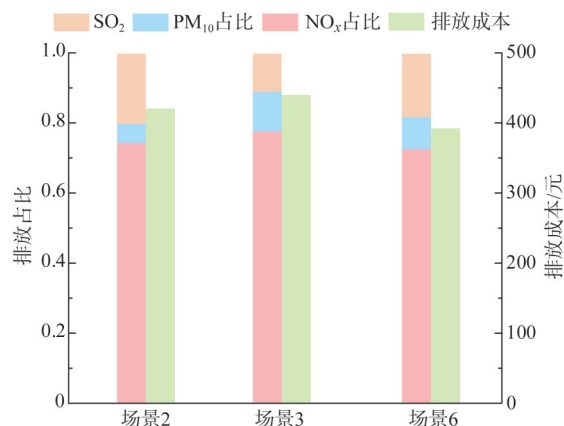


图 11 不同场景下污染物排放比例和成本

Fig. 11 Proportions and costs of pollutant emissions in different scenarios

接改变系统的运行策略，进而影响碳交易成本与碳排放量，最终作用于总成本。如图 12 所示为不同碳价所对应的碳排放量和总成本的变化，可以看出随着碳价的提高，碳排放逐渐减少，在单价为 150~350 元/t 时碳排放量降低趋势缓慢，而我国全社会碳减排的边际成本大约是 300 元/t，正处于这一区间，也侧面印证了此阶段减排的难度。同时即使碳量下降但由于高额的交易单价导致总成本线性提高。另外欧盟 ETS 系统的实践也显示出碳定价对减排的作用，该计划在 2022—2023 年间使覆盖排放量减少 16 %，不过其也伴随成本变化的问题，与本文的研究趋势一致。

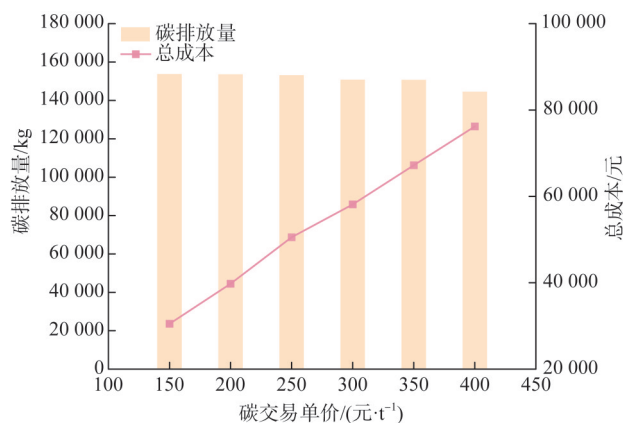


图 12 不同碳价下的碳排放量和总成本

Fig. 12 Carbon emissions and total costs under different carbon prices

图 13 是系统在不同的绿色证书交易市场价格下的风机和光伏出力变化的情况，绿证作为一种激励型机制，随着交易价格的上涨，系统会更加充分

地利用可再生能源出力以获取更多的收益,从而达到减少系统总成本的目的,同时弃风光率也不断下降,当绿证交易单价为200元/本时,系统的可再生能源出力高于其他低价格时出力,在多数时段均能完全消纳风光出力,这表明GCT机制能够有效提高可再生能源消纳并给系统带来经济效益。

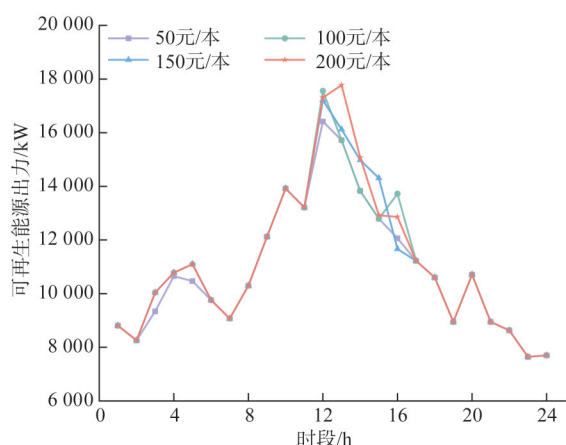


图13 不同绿证单价下的可再生能源出力

Fig. 13 Renewable energy output under different unit prices of green certificates

5 结论

本文提出一种基于热解-沼气联合运行与碳绿耦合的农村多能源系统优化调度方法,充分考虑农村能源结构特点,提高了RMES的低碳经济性,同时通过仿真算例分析,在所设置的不同场景进行对比得到以下结论。

1)引入BP-BD联合运行模式能够有效降低系统的碳排放和系统总成本,碳排放量降低了9 457.0 kg,总成本降低了6 124.8元。

2)引入CET-GCT耦合市场交易机制可进一步降低系统碳排放,相较于单一的CET和GCT机制,碳排放量分别减少了3 630.5 kg和3 460.9 kg,同时有效提升了系统可再生能源的消纳,RMES的弃能率减少了7.4%和2.8%。

3)将LCA碳核算及污染物排放因素纳入RMES优化调度中,可有效调控不同时段设备出力,使系统各时段平均碳排放降低1 142.1 kg,同时降低污染物排放成本。

4)BP-BD联合运行、CET-GCT耦合机制与LCA评估三者具有显著协同效应,BP-BD提升了生

物质能效与碳减排,CET-GCT耦合机制通过市场激励促进清洁能源消纳,LCA量化全周期环境成本,共同实现了RMES在能源、经济和环境效益上的整体优化。

由于农村地区需求侧负荷存在波动,同时供给侧的风机和光伏等设备供能具有一定的随机性,后续可考虑源荷不确定性对RMES优化调度的影响。

参考文献

- [1] 张裕,李庆生,罗宁.面向低碳经济目标的输电系统协同电网扩展规划[J].高压电器,2025,61(5):247-257.
ZHANG Yu, LI Qingsheng, LUO Ning. Collaborative power grid expansion planning of transmission and distribution system towards low-carbon economic target [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 247-257.
- [2] 卢有飞,邹时容,刘璐豪,等.基于知识共享的高比例可再生能源系统发电控制[J].高压电器,2024,60(10):33-45.
LU Youfei, ZOU Shirong, LIU Luhao, et al. Generation control of high percentage renewable energy systems based on knowledge sharing [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 33-45.
- [3] 杨胜,樊艳芳,侯俊杰,等.可再生能源ALK-PEM联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(3):68-80.
YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Multi-time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.
- [4] 杨旭东,尹继娇,刘志坚,等.考虑多重不确定性的海拔施工园区综合能源系统低碳经济鲁棒优化调度[J].电力系统保护与控制,2026,54(10):115-126.
YANG Xudong, YIN Jijiao, LIU Zhijian, et al. Robust low-carbon economic scheduling of integrated energy systems for high-altitude construction parks considering multiple uncertainties [J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(10): 115-126.
- [5] 崔杨,孙喜斌,付小标,等.考虑电转氨和生物质废能转换的农村化工综合能源系统低碳调度方法[J].电网技术,2024,48(8):3350-3360.
CUI Yang, SUN Xibin, FU Xiaobiao, et al. Low-carbon dispatch method of rural chemical industry integrated energy system considering power to ammonia and biomass waste energy conversion [J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3350-3360.
- [6] 裴越,张靖,唐孜童,等.基于改进AHP法组合赋权的变权可拓云的乡村能源系统效益评估[J].南方电网技术,2026,20(8):3-17.
PEI Yue, ZHANG Jing, TANG Zitong, et al. Benefit evaluation of rural energy systems based on variable-weight extension cloud with combined weighting via improved AHP [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(8): 3-17.
- [7] WU Y, XU Y. A comprehensive evaluation of an environmentally friendly multi-heat recovery system using biogas energy source from thermodynamic, economic, and environmental perspectives [J]. Journal of Environmental

- Chemical Engineering, 2024, 12(3): 112783.1 – 112783.11.
- [8] LIU Y, XU X, LIU Y, et al. Operational optimization of a rural multi-energy system supported by a joint biomass-solid-waste-energy conversion system and supply chain[J]. Energy, 2024(312): 133528.1 – 133528.15.
- [9] 张时聪, 李涵钰, 刘志坚, 等. 考虑建筑屋顶光伏/光热和生物质耦合的农村综合能源系统研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(7): 93 – 103.
- ZHANG Shicong, LI Hanyu, LIU Zhijian, et al. Research on rural integrated energy system considering building RTPV/T and biomass[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2025, 46(7): 93 – 103.
- [10] 栗世玮, 吴仕龙, 李咸善, 等. 考虑生物质-太阳能耦合的综合能源系统冷热电优化调度[J/OL]. 南方电网技术, [2025 – 06 – 04], 1 – 14. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20250604.0927.004>.
- SU Shiwei, WU Shilong, LI Xianshan, et al. Optimal scheduling of cooling, heating and power in an integrated energy system considering biomass-solar coupling [J/OL]. Southern Power System Technology, [2025 – 06 – 04], 1 – 14. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20250604.0927.004>.
- [11] 崔世超, 杨海柱, 白亚楠, 等. 考虑生物质燃气和电转气耦合的综合能源系统低碳优化调度[J]. 热力发电, 2025, 54(1): 56 – 66.
- CUI Shichao, YANG Haizhu, BAI Yanan, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated energy system considering coupling of power to gas and biomass gas[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(1): 56 – 66.
- [12] WANG L, NI L, WANG S, et al. Low-carbon economic dispatch of waste incineration power plant and biogas purification multi-energy coupling system considering power-to-gas[J]. Energy Reports, 2025(13): 2997 – 3012.
- [13] ONWUEMEZIE L. Rural development through solar and pyrolysis systems: Towards energy sustainability[J]. Renewable Energy, 2024(237): 121500.1 – 121500.10.
- [14] 滕云, 孙鹏, 张明理, 等. 基于农村新型产业结构的“能源-环境-经济”鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 614 – 631.
- TENG Yun, SUN Peng, ZHANG Mingli, et al. Robust optimization model of “Energy-environment-economy” based on the new rural industrial structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 614 – 631.
- [15] 尚楠, 陈政, 卢治霖, 等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 142 – 154.
- SHANG Nan, CHEN Zheng, LU Zhilin, et al. Interaction principle and cohesive mechanism between electricity market, carbon market and green power certificate market[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 142 – 154.
- [16] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含绿色证书跨链交易的综合能源系统运行优化[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1311 – 1320.
- LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Operation optimization of integrated energy system with green certificate cross-chain transaction[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1311 – 1320.
- [17] 王辉, 董宇成, 夏玉琦, 等. 考虑阶梯碳-绿证互认与重力储能的矿区综合能源系统优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(7): 54 – 67.
- WANG Hui, DONG Yucheng, XIA Yuqi, et al. Optimal scheduling of coal mine integrated energy systems considering stepped carbon-green certificate mutual recognition and gravity energy storage[J]. Electric Power, 2025, 58(7): 54 – 67.
- [18] 樊帅志, 张靖, 严儒井, 等. 考虑绿证-碳交易和热电灵活输出的 HIES 优化调度[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 86 – 96.
- FAN Shuaizhi, ZHANG Jing, YAN Rujing, et al. Optimal scheduling of HIES considering green certificate-carbon trading and flexible output of heat and power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 86 – 96.
- [19] CAO J, XU C, SI Q, et al. Scenario-driven distributionally robust optimization model for a rural virtual power plant considering flexible energy-carbon-green certificate trading[J]. Applied Energy, 2025(379): 124904.1 – 124904.13.
- [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] 陈文颖, 郑修诺, 闫倩文, 等. 绿证-碳交易交互机制下的虚拟电厂优化调度[J]. 南方电网技术, 2026, 20(3): 103 – 115.
- CHEN Wenyong, ZHENG Xiunuo, YAN Qianwen, et al. Optimal scheduling of virtual power plant under the green certificate carbon trading interaction mechanism[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(3): 103 – 115.
- [22] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1323 – 1343.
- ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323 – 1343.
- [23] DONG H, FU Y, JIA Q, et al. Low carbon optimization of integrated energy microgrid based on life cycle analysis method and multi time scale energy storage[J]. Renewable Energy, 2023(206): 60 – 71.
- [24] 高月芬, 孔凡鹏, 员成博, 等. 考虑生命周期碳排放的综合能源系统容量配置优化[J]. 热能动力工程, 2024, 39(9): 71 – 79.
- GAO Yuefen, KONG Fanpeng, YUAN Chengbo, et al. Optimization of capacity allocation of integrated energy system considering life cycle carbon emissions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 71 – 79.
- [25] 许小刚, 嵇晓鹏, 周楠楠, 等. 光-气-储互补的综合能源系统全生命周期优化研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 60 – 72.
- XU Xiaogang, JI Xiaopeng, ZHOU Nannan, et al. Research on whole life cycle optimization of integrated energy system with complementary solar, gas and storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(7): 60 – 72.
- [26] LI C, YANG H, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-biogas energy supply[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2437 – 2448.
- [27] 杨晓辉, 邓叶恒, 王晓鹏, 等. 基于碳交易-绿色证书联合交易机制的含 CHP-CCS-P2G 耦合的区域综合能源系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 244 – 254.