计及光热辅助制沼气的农村综合能源系统规划

胡恩德[1]，王 尧[1]，郑宇明[1]，申泽渊[1]，武 中[1]，赵海波[1]，赵 铎[2]
（1.国网山西省电力公司经济技术研究院，山西 太原 030001；2.太原理工大学，山西 太原 030024）

摘 要：在“碳达峰”与“碳中和”目标的驱动下，农村能源转型面临能源结构不合理、可再生能源供能占比及利用效率低等问题。针对生物质能、太阳能等可再生能源丰富的农村地区，基于温度对沼气生产效率的影响，提出了一种计及光热辅助制沼气的农村综合能源系统规划方法。首先，基于生物质能与太阳能资源耦合利用设计了农村综合能源系统架构；其次，构建了经济性最优的农村综合能源系统规划优化模型，包含能量平衡与设备运行等约束；最后，以山西某农村综合能源系统为例，对比分析有、无光热辅助制沼气两种规划方案。结果显示，采用光热辅助制沼气方案，沼气产气率提升，储能压力得到缓解，系统规划成本和碳排放显著降低，验证了文章所提规划方法的有效性和经济性。

关键词：光热；沼气；农村综合能源系统；规划；碳排放
中图分类号：TK51；S216.4；TM712 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1690-07

0 引言

农村能源系统是我国能源体系的重要组成部分。目前，在农村家庭能源消费结构中，煤炭以及电力占据了较大份额，可再生能源的应用比例相对较低。这种能源消费结构存在诸多问题，例如消费结构不合理、清洁能源占比偏低、能源利用效率不高等。

在国家大力推进乡村振兴战略的宏观背景下，农村能源消费中煤炭的占比依然高于 38.4%，农村能源优化转型迫在眉睫。随着大规模可再生能源的发展，农村能源的种类日益丰富，呈现出多元化的发展趋势，传统的单一能源系统正逐渐向综合能源系统转变，多种能源之间的互补利用成为解决农村能源问题的关键路径。通过利用先进的技术与管理模式，在农村综合能源系统设计环节，将电力、天然气、热能等独立的能源子系统进行有机耦合，从而实现不同类型能源子系统之间的协同运行以及优势互补。通过农村综合能源系统的构建与应用，提升农村能源的综合利用效率，提高可再生能源在农村能源消费中的占比，从而有效降低碳排放。

在综合能源系统规划方面，现有的研究主要面向工业园区、商业园区、城市等场景。文献[1]以园区投资运行总成本最小为优化目标，提出了一种考虑生物质能和农业柔性负荷的农业产业园区综合能源系统规划方法。文献[2]以全生命周期现值总费用最低为目标，为园区级综合能源系统建立了考虑源、荷不确定性的鲁棒多阶段规划模型。文献[3]以年总成本最低为目标对综合能源系统进行规划，通过对北京市海淀区某园区进行实例分析，验证了规划设计的综合能源系统比传统集中式能源系统具有更好的经济性和环保性。为了进一步实现综合能源系统跨部门协同与多能互补，文献[4]提出了一种分层耦合优化方法，用于城市能源系统供、需侧的跨部门协同规划。文献[5]提出一种计及氢储能与需求响应的高速公路路域综合能源系统规划方法，用于满足多能需求并提升风、光的消纳能力。文献[6]提出了一种新的发电机、输电线路和储能的集成规划方法，并使用 Benders 分解方法进行两阶段优化分解处理可再生能源存在的不确定性。文献[7]提出了一种考虑长期系统运行和短期运行调度的两阶段协调优化方法，其优化的容量配置在长期运行下具有显著的经济效益和节能效益。为减少综合能源系统的运营成本与投资成本，文献[8]以最小化燃料成本和投资成本为目标，提出了一种由电网、天然气网络和多个能源枢纽组成的综合能源系统的最优扩展规划模型。为实现全球零碳排放目标，文献[9]提出了一种

收稿日期：2025-05-24。
基金项目：国网山西省电力公司科技项目(520533240006)。
作者简介：胡恩德(1993-)，女，硕士研究生，工程师，研究方向为能源经济和电网规划技术。E-mail：z5201234379@163.com

考虑区域二氧化碳可用性的多能源系统规划模型。文献[10]基于可再生能源的间歇性和不稳定性，提出了考虑生命周期碳排放的电-热综合能源系统的协调规划模型。文献[11]以规划期内总成本最低为目标,提出了一种考虑光伏集成的综合能源系统优化规划方法。文献[12]考虑可再生能源发电设备、能量转换装置、混合储能与需求响应,提出了一种城市综合能源系统低维数矩阵建模方法,制定了以用户不适度和时空负载度为基础的需求响应弹性补贴策略。文献[13]考虑多源联供的低碳清洁性、综合能源系统对配电网的支撑性和多能互补性,建立考虑碳交易机制奖惩的配电网-多综合能源系统双层规划模型。文献[14]针对孤岛依赖传统化石能源供能引起的污染及碳排放高的问题,提出了一种考虑碳排放的孤岛综合能源系统多目标规划优化方法。

在农村综合能源系统(Rural Integrated Energy System，RIES)规划中,文献[15]设计了能源互联网背景下农村能源发展的典型框架,构建了农村能源开发成本价值核算模型。文献[16]分析了农业、气象、能源的耦合机理,研究了农村能源互联网及应用。文献[17]针对农村综合能源系统中平抑间歇式可再生能源波动造成的生态养殖热-电联产系统出力波动问题,提出了一种计及储能和热-电联产快慢协同的农村综合能源系统分层控制框架。文献[18]在农村多元产业的基础上,提出了一种包含农村多元产业、垃圾废物处理与可再生能源发电的农村多能源系统规划模型。文献[19]基于生物质能与太阳能资源的耦合利用,构建了兼顾经济性、环保性以及能效性的农村电-热综合能源系统规划优化模型。

目前,农村综合能源系统的规划还处于起步阶段,现有的研究对农村能源消费结构、多能互补潜力等关键问题缺乏深入探讨[20,21],现有规划技术多沿用城市模式,未针对农村分散式资源与需求特征进行优化与改进。现有的政策多为鼓励性条款,缺乏可落地的实施细则。农村综合能源系统试点县中仅30%完成多能互补规划编制,且政策设置碎片化,实施主体分散,难以形成合力[22]。为了助力农村能源转型,本文结合农村地区的生物质能、太阳能等资源,利用光热发电系统的余热维持沼气池发酵的最佳温度,实现农村地区可再生能源设备和储能的优化规划。

1　农村综合能源系统框架及设备模型

1.1　计及光热辅助制沼气的农村综合能源系统框架

我国农村地区农作物秸秆、农产品加工剩余物等农业生产废弃物产量巨大，蕴含着可观的生物质能潜力;农业畜禽养殖废弃物数量庞大,畜禽粪便不仅产量高,而且有机物含量丰富,通过厌氧发酵等技术可高效转化为沼气。二者共同构成了农村生物质能开发利用的物质基础，为农村综合能源系统建设提供了丰富且可持续的资源保障。

我国农村地区太阳能资源丰富，太阳能年利用小时数高,但农村经济水平相对较低,太阳能利用设备匮乏,导致太阳能资源利用率低。农村分散的能源需求与屋顶、农田等闲置空间高度适配,为光伏、光热设备提供了低成本应用场景。为充分利用农村地区丰富的生物质能和太阳能资源，本文提出了计及光热辅助制沼气的农村综合能源系统的规划方法,系统框架如图1所示。

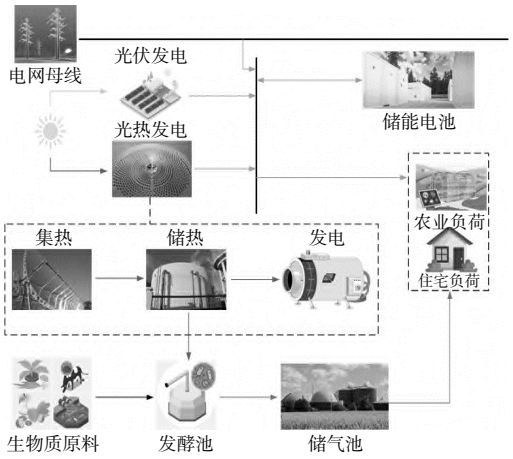


图1　计及光热辅助制沼气的农村综合能源系统框架
Fig.1 Framework of RIES considering photothermal assisted biogas production

1.2　设备模型

结合能源转换与存储，农村综合能源系统的关键设备建模如下。

1.2.1　光伏发电功率模型

光伏出力受太阳辐照强度和电池板实际运行温度的影响,其发电功率模型为

$$P^{\mathrm{PV}}=P^{\mathrm{ED}}\frac{F^{\mathrm{TY}}}{F^{\mathrm{ED}}}\left[1+k\left(W^{\mathrm{SJ}}-W^{\mathrm{BZ}}\right)\right] \tag{1}$$

式中:P^{PV}为分布式光伏的发电功率;P^{ED}为分布式光伏在额定条件下的最大发电功率;F^{TY}为太阳辐照强度;F^{ED}为额定条件下的太阳辐照强度;k为电池板功率温度系数;W^{SJ}为电池板实际的运行温度;W^{BZ}为电池板在标准测试条件下的温度。

1.2.2 光热发电模型

光热发电系统是将光能转换成热能再转换成电能的发电系统。含储热的光热电站主要由集热子系统、储热子系统和发电子系统3部分组成。在光热发电系统的负载水平较低时,可先由储热子系统存储热量,在负荷水平较高时,储热子系统可以释放热能发电,充分体现了光热发电的能源时移性。

①集热环节

光场吸收太阳能的热功率模型:

$$H_t^{CSP}=\eta^{GR}S^{JC}x_t^{ZJ} \tag{2}$$

光场热损耗模型:

$$H_t^{RS}=\eta^{RS}H_t^{CSP} \tag{3}$$

导热工质热功率模型:

$$H_t^{CD}=H_t^{CSP}-H_t^{RS} \tag{4}$$

式中:H_t^{CSP}为光场吸收太阳能的热功率;η^{GR}为光-热转换效率;S^{JC}为镜场面积;x_t^{ZJ}为t时刻的直接辐照强度;H_t^{RS}为光场追踪策略调整时造成的热损耗;η^{RS}为集热子系统的热损耗系数;H_t^{CD}为集热环节传递给导热工质的热功率。

②储热环节

储热装置存储日间吸收的热量,储热环节建模如下。

蓄热功率约束:

$$H_t^{XR}=\eta^{XR}H_t^{HT} \tag{5}$$

放热功率约束:

$$H_t^{FR}=\frac{H_t^{TH}}{\eta^{FR}} \tag{6}$$

储热装置储热量约束:

$$H_t^{RL}=(1-\eta^{LOSS})H_{t-1}^{RL}\Delta t+(H_t^{XR}-H_t^{FR})\Delta t \tag{7}$$

式中:H_t^{XR}为t时刻储热装置的蓄热功率;H_t^{FR}为t时刻储热装置的放热功率;H_t^{HT}为t时刻导热工质传递给储热装置的热功率;H_t^{TH}为储热装置传递给导热工质的热功率;η^{XR}为储热装置的蓄热效率;H_t^{RL}为t时刻储热装置的储热量;η^{LOSS}为储热装置的热损失率。

③发电环节

光热发电装置将热能转化为电能,发电环节建模为

$$P_t^{CSP}=\eta^{RD}H_t^{DF} \tag{8}$$

式中:P_t^{CSP}为发电功率;η^{RD}为热电转换效率;H_t^{DF}为导热工质传递给发电装置的热功率。

1.2.3 生物质沼气池模型

沼气产气率受温度的影响较大,需要一定的热能维持沼气池的正常发酵。因此,可利用储热子系统的部分热能为沼气池供热。储热子系统中的导热工质通过管道直接输送至沼气池的换热器,为沼气池提供稳定热源,使沼气池反应温度维持在最佳水平。

沼气池的沼气产量模型:

$$B_t^{PRO}=x\left|T_t^{SJ}-T^{ZJ}\right|+y \tag{9}$$

沼气池的实际反应温度是由光热余热H_t^{MT}和环境散热H_t^{MLOSS}的动态平衡决定的,当实际反应温度低于最佳反应温度则须通过光热系统余热补充热量,若高于最佳反应温度则减少供热,使沼气池的运行温度保持在最佳水平,因此沼气池反应温度模型为

$$T_{t+1}^{SJ}=T_t^{SJ}+\frac{H_t^{MT}-H_t^{MLOSS}}{V^{BI}c^{R}\rho^{M}} \tag{10}$$

沼气池热量耗散模型:

$$H_t^{MLOSS}=(c^{R}M+r^{CR}s^{SR})(T^{SJ}-T^{OUT}) \tag{11}$$

式中:B_t^{PRO}为t时刻沼气池的沼气产量;T_t^{SJ},T^{ZJ}分别为生产沼气的实际反应温度和最佳反应温度;x为受温度影响的产气系数;y为基础产气量;H_t^{MT}为维持沼气池温度为T^{ZJ}时所需的热量;H_t^{MLOSS}为沼气池耗散的热量;V^{BI}为沼气池容积;c^{R}为投料热容;ρ^{M}为投料密度;M为投料质量;s^{SR}为池内散

热面积;r^{CR}为传热系数;T^{OUT}为沼气池的外部温度。

1.2.4　沼气发电机组模型

沼气发电机组的输出功率与沼气产量和沼气热值相关,其模型为

$$B_t^{BT}=\frac{P_t^{BG}\Delta t}{\eta^{BG}B^{DR}} \tag{12}$$

式中:B_t^{BT}为 t 时刻沼气发电机组消耗的沼气量;B^{DR}为沼气的低位热值;Δt 为时间步长;P_t^{BG}为 t 时刻沼气发电机组输出的电功率;η^{BG}为沼气发电机组的发电效率。

1.2.5　储能电池模型

储能电池具有平衡电力供需的能力，其充、放电是一个连续的过程,为了保障储能电池的运行寿命与充、放电能力,须要充分考虑设备容量与充、放电约束。储能电池容量模型为

$$E_{t+1}^{SOC}=E_t^{SOC}(1-\alpha)+\eta^{EES,C}R^{EES,C}P_t^{EES,C}\Delta t-\frac{1}{\eta^{EES,D}}R^{EES,D}P_t^{EES,D}\Delta t \tag{13}$$

储能电池充、放电状态约束:

$$R^{EES,C}+R^{EES,D}\in(0,1) \tag{14}$$

储能电池容量约束:

$$E^{SOCMIN}\leqslant E_t^{SOC}\leqslant E^{SOCMAX} \tag{15}$$

式中:E_t^{SOC}为储能电池在 t 时刻的储电容量;α 为储能电池自放电率;$\eta^{EES,C}$,$\eta^{EES,D}$分别为储能电池的充电和放电效率;$R^{EES,C}$,$R^{EES,D}$分别为储能电池的充电和放电状态变量;E^{SOCMAX},E^{SOCMIN}分别为储能电池容量的上、下限。

2　农村综合能源系统规划优化模型

2.1　目标函数

本研究以农村综合能源系统总体规划成本 C 最低为目标函数，总体规划成本 C 包括投资、运维和购电成本之和 C^{EC} 与系统碳排放成本 C^{EN}。

$$\min C=C^{EC}+C^{EN} \tag{16}$$

$$C^{EC}=C^{INV}+C^{O\&M}+C^{BUY} \tag{17}$$

$$C^{EN}=\tau\sum_{t=1}^{T}(\varphi^{EL}P_t^{EL}) \tag{18}$$

式中:C^{INV}为设备的投资成本;$C^{O\&M}$为设备的运行、维护成本;C^{BUY}为从外部系统购买能源的成本;τ 为单位碳排放成本;φ^{EL}为外部系统中电能的碳排放系数。

式(17)中各种成本的计算式为

$$C^{INV}=\sum_{i\in I}\left[\frac{r(1+r)^{y_i}}{(1+r)^{y_i}-1}c_i^{INV}CA_i\right] \tag{19}$$

$$C^{O\&M}=\sum_{i\in I}(c_i^{O\&M}CA_i) \tag{20}$$

$$C^{BUY}=c^{EL}\sum_{t=1}^{T}P_t^{EL} \tag{21}$$

式中:I 为设备种类集合;i 为设备类型;c_i^{INV}为设备 i 的单位容量投资成本;CA_i 为设备 i 的总配置容量;y_i 为设备寿命期;r 为折现率;$c_i^{O\&M}$为设备 i 的单位容量年运行、维护成本;T 为系统运行时段;c^{EL}为向大电网购电的价格;P_t^{EL}为 t 时刻的购电量。

2.2　约束条件

①电功率平衡约束

$$P_t^{PV}+P_t^{BG}+P_t^{EES,D}+P_t^{BUY}=P_t^{LOAD}+P_t^{LOSS} \tag{22}$$

式中:P_t^{PV}为 t 时刻光伏的发电功率;P_t^{BG}为 t 时刻沼气的发电功率;$P_t^{EES,D}$为 t 时刻储能电池的放电功率;P_t^{BUY}为 t 时刻从外部电网购买的电量;P_t^{LOAD}为 t 时刻的电负荷;P_t^{LOSS}为 t 时刻的电功率损耗。

②生物质沼气功率平衡约束

$$B_t^{PRO}=B_t^{BT}+B_t^{LOAD}+B_t^{LOSS} \tag{23}$$

式中:B_t^{LOAD}为 t 时刻的沼气负荷;B_t^{LOSS}为 t 时刻的沼气损耗。

③设备运行约束

$$P_i^{MIN}\leqslant P_i\leqslant P_i^{MAX} \tag{24}$$

式中:P_i^{MIN},P_i^{MAX}分别为设备i 的最小、最大运行功率。

3　算例分析

3.1　算例设置

本文以山西省某农村为算例分析对象,规划的能源设备包括分布式光伏和光热发电系统、生物质沼气池、沼气发电机组以及储能电池,各设备的相关参数如表 1 所示[18,19]。同时,利用 k-means

表 1 能源设备参数

Table 1 Energy equipment parameters

设备名称	建设成本	维护成本	效率/%	寿命/a
光伏发电系统	2 500 元/kW	0.36 元/kW	18	20
光热发电系统	6 000 元/kW	0.06 元/kW	20	20
生物质沼气池	2 000 元/m³	0.96 元/m³		20
沼气发电机组	9 000 元/kW	0.13 元/kW	40	20
储能电池	1 800 元/kW	0.36 元/kW	90	10

聚类方法生成该农村一年中各季度典型日的光照强度,典型日划分为 24 h,时间步长为 1 h。

为了验证本文所提农村综合能源规划方法的合理性,设置两种规划场景,并进行经济性分析。

场景 1:光热发电系统仅用于发电,不参与沼气池发酵过程。

场景 2:白天光照充足时,光热系统将一部分热能直接输送至沼气池,辅助沼气池发酵,另一部分热能则储存至储热系统。夜间无光照时,调用储热系统中的热能,为沼气池供热。

3.2 规划结果分析

两种场景下各能源设备的规划结果如表 2 所示,成本对比如图 2 所示。由表 2 可以看出:与场景 1 相比,场景 2 光热发电系统容量增加 30 kW、沼气池容积扩大 30 m³,以强化余热利用与沼气生产;分布式光伏发电系统与储能电池容量分别下降 10 kW 和 20 kW·h,反映了多能互补对单一能源依赖的弱化。场景 2 的设备投资虽然增加了 60 万元,但其沼气发电能力得到提升,外部购电成本降低了 70 万元,使得电网碳排放成本降低了 42 万元,规划总成本较场景 1 下降 45 万元。此外,光热辅助制沼气使沼气产气率提高,储能压力减轻,系统能效与稳定性显著提升,凸显了本文所提规划方法的优势与经济性。

表 2 两种场景下能源设备的规划结果

Table 2 Planning results for energy equipment in the two scenarios

设备名称	场景 1	场景 2
光伏发电系统	100 kW	90 kW
光热发电系统	70 kW	100 kW
生物质沼气池	120 m³	150 m³
沼气发电机组	25 kW	35 kW
储能电池	60 kW·h	40 kW·h

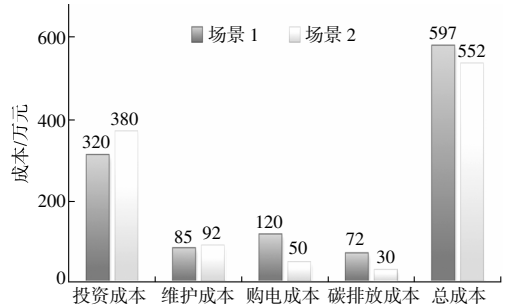


图 2 两种场景下的规划成本对比

Fig.2 Comparison of planning costs in the two scenarios

各季节典型日的沼气产量如图 3 所示。由图 3 可以看出,场景 2 中各季节的沼气产量均高于场景 1 至少 70%。这是因为场景 2 中光热系统为沼气池提供稳定的热能,使其能在最佳反应温度下发酵,极大地提高了产气效率。而场景 1 受环境温度影响大,实际反应温度常低于最佳反应温度,导致产气效率下降。

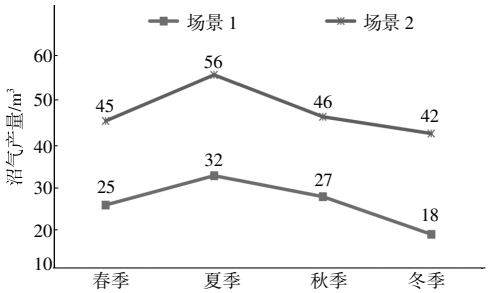
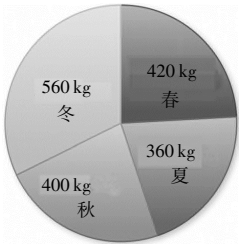


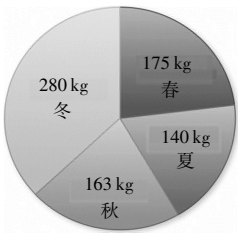
图 3 两种场景下各季节典型日的沼气产量

Fig.3 Biogas production on the typical day of each season in the two scenarios

各季节典型日的碳排放量如图 4 所示。由于场景 2 中光热系统辅助沼气池稳定产气,沼气发电替代了大量来自外部电网的电力,其典型日的



(a)场景 1



(b)场景 2

图 4 两种场景下各季节典型日的碳排放量

Fig.4 Carbon emissions on the typical day of each season in the two scenarios

CO_2 总排放量比场景 1 减少了 982 kg。以冬季为例,场景 1 因环境温度低,沼气池因无热量供应而不能维持正常发酵温度,使得沼气产量减少,进而导致沼气发电量降低,须从外部电网大量购电,产生 560 kg CO_2。场景 2 通过光热维持沼气池最佳反应温度,沼气产量提高,使得外购电量减少,碳排放量显著降低,减排幅度达 50%。

4　结论

本文提出了计及光热辅助制沼气的农村综合能源系统规划方法，通过构建以经济性最优为目标的规划优化模型，考虑能量平衡与设备运行等约束条件，实现农村综合能源系统中分布式光伏发电系统、光热发电系统、生物质沼气池、沼气发电机组以及储能电池等设备容量的合理配置。选取山西省某农村进行算例分析，设置光热是否参与制沼气两种场景。结果显示：光热参与制沼气时,沼气产气率提高,储能压力得到缓解;在设备规划上，光热发电系统容量增加、沼气池容积扩大,分布式光伏与储能电池容量下降,体现了多能互补的优势；在成本方面，虽然设备投资有所增加，但沼气发电能力提升使外部购电成本和电网碳排放量显著降低,规划总成本下降。此外,系统能效与稳定性也得到显著提升。

综上所述，本文所提规划方法有效提高了农村综合能源系统的可再生能源利用效率，降低了碳排放量,提升了系统的经济性和稳定性,为农村能源转型提供了可行方案。

参考文献:

[1] 姜德威,高红均,贺帅佳,等.考虑生物质能和农业柔性负荷的农业产业园区综合能源系统规划方法[J].电网技术,2024,48(5):1836-1845.

[2] 张东月,张照彦,王培光,等.基于预测偏差惩罚和绿色证书交易的商服中心综合能源系统日前调度优化[J].中国测试,2022,48(10):100-108.

[3] 张文轩,苏珈,杜欣慧,等.计及需求响应的电-氢-气综合能源系统分布式鲁棒规划[J].电力建设,2025,46(7):108-122.

[4] Huang Y,Kang J,Liu L,et al.A hierarchical coupled optimization approach for dynamic simulation of building thermal environment and integrated planning of energy systems with supply and demand synergy [J].Energy Conversion and Management,2022,258:115497.

[5] 梁俊鹏,张高航,李凤婷,等.计及氢储能与需求响应的路域综合能源系统规划方法[J].电网技术,2024,48(12):4918-4927.

[6] D Lee,D Kim,S K Joo.Interval-stochastic programming for integrated generation,transmission,and energy storage system (ESS)planning considering uncertainty in renewable energy sources [J].IEEE,2025,13:30834-30844.

[7] 阙凌燕,蒋正威,杨力强,等. 基于改进遗传算法的源网荷储协同控制方法[J].沈阳工业大学学报,2023,45(6):612-618.

[8] W Dong,Z Lu,L He,et al.Optimal expansion planning model for integrated energy system considering integrated demand response and bidirectional energy exchange[J].CSEE Journal of Power and Energy Systems,2023,9(4):1449-1459.

[9] D Xu,A Hu,C S Lam,et al.Cooperative planning of multi-energy system and carbon capture,utilization and storage [J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2024,15(4):2718-2732.

[10] 陈琦,李红伟,周海林.考虑风电消纳的电-热综合能源系统经济运行研究[J].中国测试,2022,48(1):116-121.

[11] H Fang,D Fan,X Jiang,et al.Optimal planning of integrated energy system considering photovoltaic integration [A].2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES) [C].Guangzhou:IEEE,2021.

[12] 王晨宇,卢志刚,李彦琳,等.考虑混合储能和需求响应的城市综合能源系统协同规划方法[J].高电压技术,2025,51(1):191-199.

[13] 程杉,程颖,贺彩,等.考虑不确定性的配电网-多综合能源系统分布式协同规划[J].电力自动化设备,2024,44(11):24-32.

[14] 王晓鹰,徐婧,杨兆宇,等.考虑碳排放的孤岛综合能源系统多目标规划优化[J].热力发电,2023,52(10):129-137.

[15] 杨莘博,谭忠富,薛帆,等."能源互联网+农村能源"典型场景、商业模式及成本价值核算研究[J].分布式能源,2021,6(3):19-31.

[16] 马令希,付学谦.考虑农业-气象-能源耦合的农业能源互联网理论及应用 [J]. 中国电力,2021,54(11):115-124.

[17] 黄扬琪,何伟,赵伟哲,等.计及动态响应特征的农村综合能源系统分层调控[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(2):122-129.

[18] 李民,刘钦浩,赵冠,等.考虑多元产业协同的乡村综

合能源系统规划[J].中国电力,2022,55(8):14-22.
[19] 王永利,韩煦,刘晨,等.基于生-光耦合利用的乡村电-热综合能源系统规划[J].电力建设,2023,44(3):1-14.
[20] 曲艺.专访把握“三农”发展特点推动农村能源革命[EB/OL].https://cpnn.com.cn/news/zngc/202311/t20231120_1652064.html,2025-04-11.
[21] 胡晓燕,包晓,佘宗昀.农村新型能源体系建设的挑战与对策[EB/OL].https://mp.weixin.qq.com/s/UQmbDARMnha2X5gokUIngw,2025-03-19.
[22] 国家能源局,生态环境部,农业农村部.推进农村能源革命,描绘绿水青山新画卷[EB/OL].https://finance.people.com.cn/n1/2023/0428/c1004-32675716.html,2025-04-12.

Planning of rural integrated energy system with photo-thermal assisted biogas production

Hu Ende[1], Wang Yao[1], Zheng Yuming[1], Shen Zeyuan[1], Wu Zhong[1], Zhao Haibo[1], Zhao Duo[2]
(1.State Grid Shanxi Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Taiyuan 030001, China; 2.Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Driven by the goals of "Carbon Peak" and "Carbon Neutrality", the rural energy transition is faced with the problems of irrational energy structure, low proportion of renewable energy supply and low utilisation efficiency. For rural areas endowed with renewable energy sources such as biomass and solar energy, a rural integrated energy system (RIES) planning method considering photo-thermal assisted biogas production is proposed based on the effect of temperature on the efficiency of biogas production. Firstly, a RIES architecture is designed based on the coupled use of biomass and solar energy resources, and secondly, an economically optimal integrated rural energy planning optimisation model is constructed, which contains constraints such as energy balance and equipment operation. Finally, the example compares two planning scenarios with and without photothermal-assisted biogas production using a rural area in Shanxi as a scenario, and the results show that the biogas production rate is improved, the pressure on energy storage is alleviated, and the system planning cost and carbon emission are sig-nificantly reduced, which verifies the validity and economy of the proposed planning model.

Keywords: photo-thermal; biogas; rural integrated energy system; planning; carbon emission