doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.054

考虑农机电能替代的生物质耦合太阳能农村能源系统规划

景晨辉[1]　郑宗明[2]　侯宏娟[1]　陈月锋[3]　段若楠[2]　杨　晓[4]

(1.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2.华北电力大学新能源学院,北京 102206;
3.中国农业机械化科学研究院集团有限公司浙江分公司,绍兴 312000;4.中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:在双碳目标的背景下,农村地区的能源转型已成为实现绿色发展的关键环节。我国农村传统农业机械(包括拖拉机和收获机)对化石燃料高度依赖,亟需向以电动农机为代表的低碳、可持续发展模式转变,这将有助于促进可再生能源的利用,为农业可持续发展提供环境友好的解决方案。针对农村地区太阳能与生物质能等可再生资源丰富的特点,考虑农机运行特性与农业柔性负荷,提出了农机电能替代下生物质耦合太阳能农村能源系统规划方法。首先,构建了考虑电动农机的农村能源系统框架,同时对电动农机负荷及农业柔性负荷进行建模分析。其次,建立了以经济成本和碳排放量最小为目标的系统规划优化模型,采用非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)和商业求解器 Gurobi 协同求解。最后,以我国东北地区某农场为例进行规划模拟,结果表明,引入电动农机和农业柔性负荷后,在考虑电动农机购入的条件下,农机系统总成本降低 24%,碳排放量降低 46%。

关键词:电动农机;农村综合能源系统;系统规划;农业柔性负荷

中图分类号:S231;TM715　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)05-0560-09　　**OSID**:

Planning of Rural Energy System Integrating Biomass and Solar Energy with Electrification of Agricultural Machinery

JING Chenhui[1]　ZHENG Zongming[2]　HOU Hongjuan[1]　CHEN Yuefeng[3]　DUAN Ruonan[2]　YANG Xiao[4]

(1. *State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*
2. *School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*
3. *Zhejiang Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Shaoxing* 312000, *China*
4. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Under the background of dual-carbon goals, energy transition in rural areas has become a critical element in achieving green development. Traditional agricultural machinery in rural China, such as tractors and harvesters, heavily relies on fossil fuels, necessitating a shift toward low-carbon and sustainable development models represented by electric agricultural machinery. This transition promoted the utilization of renewable energy and provided an environmentally friendly solution for sustainable agricultural development. Considering the abundance of renewable resources like solar energy and biomass in rural areas, as well as the operational characteristics of agricultural machinery and flexible agricultural loads, a planning method for a rural energy system integrating biomass and solar energy with electrified agricultural machinery was proposed. Firstly, the framework of rural energy system considering electric farm machines was constructed, and the load of electric farm machines and the flexible load of agriculture were modeled and analyzed at the same time. Secondly, an optimization model was established with the objectives of minimizing economic costs and carbon emissions, and solved collaboratively by using the non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ) and the commercial solver Gurobi. Finally, a planning simulation was carried out for a farm in Northeast China. Results showed that introducing electric agricultural machinery and agricultural flexible loads reduced total system

收稿日期:2025-01-14　修回日期:2025-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(32171915)

作者简介:景晨辉(2000—),男,硕士生,主要从事农村综合能源系统优化研究,E-mail:j_chen_hui@163.com

通信作者:郑宗明(1974—),男,教授,博士,主要从事区域新型能源系统研究,E-mail:zmzheng@vip.126.com

costs by 24% and carbon emissions by 46% under the condition of considering the purchase of electric agricultural machinery.

Key words: electric agricultural machinery; rural integrated energy systems; system planning; agricultural flexible load

0　引言

随着我国“双碳”目标的提出，能源问题日益受到广泛关注。与此同时，在乡村振兴战略的持续推进和农业快速发展的背景下，乡村地区对新能源的需求与日俱增[1]。当前，我国农村能源结构主要由化石燃料和生物质能构成[2-3]，其中煤炭、秸秆、木柴和电力是最主要的能源形式。煤炭消费仍占主导地位，而清洁能源和可再生能源的使用比例较低。农村能源消费存在诸多不合理之处，特别是化石燃料的可预见性枯竭及其对环境造成的严重影响，这些问题亟待解决。我国农业碳排放量占世界农业碳排放总量的 16% ~17%[4]，随着农业机械制造能力的提升，农业机械数量显著增加[5]，由化石燃料驱动的生产运输工具，如私家车和农业机械（Agricultural machinery，AM），正在造成严重的环境问题和巨大的碳排放，导致农业生产活动中的碳排放呈现持续上升趋势[6]。因此，为减少农业生产对化石燃料依赖，农业机械的电气化至关重要。

在农村地区提高经济发展和生活水平的需求推动下，农村综合能源系统（Rural integrated energy system，RIES）正在经历快速发展[7]，农村新型能源系统转型与规划的问题日益受到学术界关注，已有研究针对不同典型场景展开了深入探讨，包括华北平原的分散村庄[8]、华中地区的低碳村镇[9]以及农村综合能源站[10]等，这些研究为农村综合能源系统的优化规划提供了重要参考。

在针对电动农机（Electric agricultural machinery，EAM）的研究中，文献[11 - 15]关注了 EAM 与新能源发电结合的技术路线以及对未来电动农机发展的预测，但未对 EAM 与 RIES 之间相互作用的影响进行深入分析。

为有效应对当前 EAM 在农村能源应用中面临的问题，本文立足于农村丰富的生物质与太阳能资源特点，考虑 EAM 替代与农业柔性负荷，开展生物质耦合太阳能 RIES 规划研究，以期为 EAM 在农村推广与应用提供一种解决方案。

1　考虑农机电能替代的农村能源系统框架及建模

图 1 为考虑 EAM 的 RIES 框架，包含能源供应侧、能源转换部分、能源需求侧 3 部分。

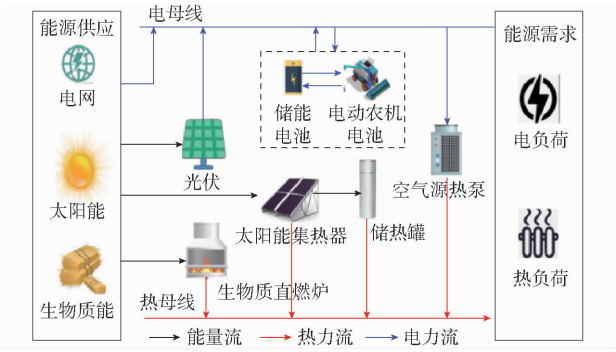

图 1　考虑 EAM 的 RIES 框架

Fig. 1　RIES framework considering EAM

能源供给主要来自当地电网和太阳能以及丰富的生物质资源，能源需求主要包括当地居民的生活用能以及农业生产用能，其中电负荷主要由光伏发电（Photovoltaic，PV）、电网以及电池储能系统（Battery energy storage system，BES）来满足，热负荷主要由光热系统（Photothermal system，PPG）、生物质直燃炉（Biomass direct combustion furnace，BDG）、储热水箱（Heat storage tank，HST）以及空气源热泵（Air-source heat pump，AHP）来满足。

考虑农机使用具有周期性，将 RIES 分为农忙和农闲两种情况，在农忙时，电动农机作为一种农业生产负荷，系统优先供给，确保农业生产顺利进行，在农闲时，电动农机电池嵌入 RIES 中，参与系统正常运行，同时可以利用峰谷电价，增加农户收益。

1.1　电动农机负荷模型

不同种类的农业机械在各自工作场景下的能源消耗存在着显著差异[16]，本文提出的农机电能替代方案全面考虑了农业工作周期中的主要机械类型，包括拖拉机和收获机等大型农机，也涉及动力较小且充电便捷的插秧机、弥雾机等小型农机。以拖拉机为例进行分析，电动拖拉机可以和农机具连接在一起以机组形式进行作业，也可以牵引挂车进行运输，拖拉机工作时受到各种力的影响，如滚动阻力、空气阻力、加速阻力、坡道阻力以及牵引阻力等[17]，典型作业场景主要包括田间运输转移、旋耕和犁耕等。

在田间运输及转移中，作业速度与其他作业工况相比，速度较快，所以考虑了加速阻力，其行驶过程中的驱动力为

$$F_{q1} = F_{f1} + F_j \tag{1}$$

式中 F_{q1}——农机田间运输及转移驱动力,N

F_{f1}、F_j——农机行驶中阻力和田间运输加速阻力,N

在农机进行具体农业作业中,其作业过程中的驱动力也各不相同,如拖拉机在进行旋耕和犁耕作用时的驱动力为:

在拖拉机旋耕作业时

$$F_{q2} = F_{f2} + F_X \tag{2}$$

在犁耕作业中

$$F_{q3} = F_{f3} + F_L \tag{3}$$

式中 F_{q2}——拖拉机旋耕作业驱动力,N

F_{f2}、F_X——拖拉机旋耕作业行驶阻力、拖拉机旋耕阻力,N

F_{q3}、F_{f3}、F_L——拖拉机犁耕作业驱动力、犁耕作业行驶阻力、犁耕阻力,N

电动农机的驱动力与驱动电机转矩的关系为

$$F = \frac{T_{tq} i_g i_0 \eta_T}{R} \tag{4}$$

其中

$$T_{tq} = \frac{9\,550P}{n} \tag{5}$$

式中 T_{tq}——电机转矩,N·m

i_g、i_0、η_T——变速器传动比、主减速器传动比、传动系传动效率

R——拖拉机车轮半径,m

P——输出功率,W

n——电机转速,r/min

电机转速与农机速度的关系为

$$u_a = 0.377 \frac{Rn}{i_g i_0} \tag{6}$$

式中 u_a——农机速度,km/h

推导可得电动农机行驶工作过程中消耗的电池电量可表示为[18]

$$Q_1 = \frac{F_q s}{9\,550U \times 0.377 \eta_T \eta} \tag{7}$$

式中 s——电动农机行驶工作的距离,m

η——电动农机运行的总效率

U——电动农机工作电压,V

1.2 农业园区柔性负荷模型

农业柔性负荷是指在农业生产过程中,可以被调整或控制的电力或其他形式的能量。这些负荷可以根据电网的需求或能源价格的变化进行灵活调整,而不会对农业生产造成显著的负面影响[19]。

在农村农业园区中[20],补光灯对农作物进行补光的负荷,对农作物进行灌溉的负荷,抽水泵抽水送往蓄水池的负荷,都可被定义为可时移负荷,即可以在周期内在时间维度上有计划地调动,在整个周期内消耗的总电能是一定的。

(1)补光灯模型

农业园区中的补光灯电负荷计算公式为

$$\begin{cases} \sum\limits_{t \in T_n} P_t^L \Delta t = P_{\text{sum}}^L \quad (0 \leqslant P_t^L \leqslant P_{\max}^L) \\ P_t^L = 0 \quad (t \in T_d) \end{cases} \tag{8}$$

式中 P_t^L——周期内补光灯的消耗功率

Δt——周期内补光灯工作时段

P_{sum}^L——补光灯在规划周期总电负荷

$P_{\max}^L$——周期内补光灯能最大电功率

T_n——调度周期中补光灯能工作的时间

T_d——调度周期中不需要工作的时间段

(2)灌溉设备模型

为了简化计算,假定抽水泵的给水速率和灌溉器的用水速率是相等的,将灌溉器在一个时间段内消耗的水量作为 1 单元的水量,在优化周期内的蓄水池水量计算公式为

$$N_t^{\text{water}} = N_0^{\text{water}} + \sum_{\tau=1}^{t} (X_\tau^{\text{pump}} - X_\tau^{\text{irrigator}}) \quad (N_{\min}^{\text{water}} \leqslant N_t^{\text{water}} \leqslant N_{\max}^{\text{water}}) \tag{9}$$

式中 N_t^{water}——周期内蓄水池的水量

N_0^{water}——水池的初始水量

X_τ^{pump}、$X_\tau^{\text{irrigator}}$——泵与灌溉器的开关变量

$N_{\max}^{\text{water}}$、$N_{\min}^{\text{water}}$——水池水量的上、下限

(3)柔性负荷功率平衡

农业柔性负荷的功率平衡与上下限约束公式为

$$P_{LA}^t = P_{LA,B}^t + P_{\text{tran}}^t \tag{10}$$

$$\begin{cases} P_{\text{tran}}^t = B_{\text{e,in}}^t P_{\text{in}}^t - B_{\text{e,out}}^t P_{\text{out}}^t \\ 0 \leqslant B_{\text{e,in}}^t + B_{\text{e,out}}^t \leqslant 1 \\ \sum\limits_{t=1}^{T} P_{\text{tran}}^t = 0 \\ P_{\text{tran,min}}^t \leqslant P_{\text{tran}}^t \leqslant P_{\text{tran,max}}^t \end{cases} \tag{11}$$

式中 P_{LA}^t——t 时段需求响应后的电负荷功率

T——系统优化周期

$P_{LA,B}^t$——t 时段的初始电负荷功率

P_{tran}^t——t 时段的时移电负荷功率

P_{in}^t、P_{out}^t——t 时段的电负荷移入、移出功率

$B_{\text{e,in}}^t$、$B_{\text{e,out}}^t$——t 时段的电负荷移入、移出状态变量

$P_{\text{tran,max}}^t$、$P_{\text{tran,min}}^t$——t 时段可时移电负荷功率的上、下限

2 RIES 双层规划模型

以系统周期成本和碳排放量来反映综合能源系

统的经济性和环境效益并建立双层规划模型，上层规划设备容量配置，下层规划设备运行调度，规划模型如图 2 所示。

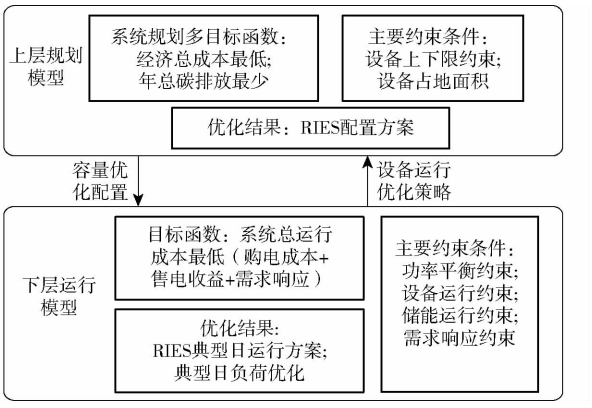

图 2　多目标双层规划模型

Fig. 2　Multi-objective double-layer programming model

2.1　上层规划模型

2.1.1　上层目标函数

上层规划模型为多目标规划，其目标函数分别为 RIES 的系统周期成本与碳排放量。

（1）目标函数 1：系统周期成本

系统周期成本包括系统投资成本与运维成本，以周期成本最小建立目标函数。设备投资成本是指初期购买设备与安装费用，运维成本是指设备在运行过程中的维修保养费用[21]，系统周期公式为

$$\min f_1 = C^{INV} + C^{MAI} + C^{OPT} \tag{12}$$

其中

$$C^{INV} = \sum_{i \in I} \frac{g(1+g)^{n_i}}{(1+g)^{n_i}-1} c_i^{INV} M_i \tag{13}$$

$$C^{MAI} = \sum_{i \in I} c_i^{MAI} M_i \tag{14}$$

式中　f_1——系统周期成本

C^{INV}——投资成本

C^{MAI}——系统运维成本

C^{OPT}——系统运行成本

I——综合能源系统设备

i——设备类型

n_i——设备使用年限

g——折现率

c_i^{INV}——设备单位容量投资成本

c_i^{MAI}——设备单位容量运维成本

M_i——设备 i 的配置容量

（2）目标函数 2：系统总碳排放

碳排放量是评估环境效益的重要指标，系统碳排放核算边界包括全年向外部电网购电量和燃料燃烧产生的二氧化碳量，由于生物质具有碳中和特性，因此在核算时仅考虑外部电网电力，系统碳排放量公式为

$$\min f_2 = \sum_{t \in T} \Delta t \varphi_1^e P_t^{buy} \tag{15}$$

式中　f_2——系统碳排放量

φ_1^e——系统外部电能的碳排放系数

P_t^{buy}——系统向外部电网购电量

2.1.2　上层约束条件

（1）规划面积约束

各设备的占地面积需满足总规划面积，约束为

$$\sum_{i=1}^{I} x_i S_i \leqslant S_{\max} \tag{16}$$

式中　x_i——第 i 种设备的容量，kW

S_i——第 i 种设备单位容量占地面积，m^2/kW

$S_{\max}$——总规划面积，m^2

（2）设备容量约束

各设备容量需满足容量上下限，约束为

$$P_{\min}^i \leqslant P \leqslant P_{\max}^i \tag{17}$$

式中　$P_{\min}^i$——设备 i 的最小功率，kW

$P_{\max}^i$——设备 i 的最大功率，kW

2.2　下层运行模型

基于上层规划的规划方案，下层运行模型考虑系统运行成本包括购电成本、售电收益及补偿柔性负荷成本。

2.2.1　下层目标函数

目标函数为

$$\min\ C^{OPT} = C_{dr}^{RIES} + C_{\text{buy}}^{\text{grid}} - C_{\text{sell}}^{\text{grid}} \tag{18}$$

购电成本为

$$C_{\text{buy}}^{\text{grid}} = \sum_{t \in T} c_t^e P_t^{buy} \tag{19}$$

售电收益为

$$C_{\text{sell}}^{\text{grid}} = \sum_{t \in T} c_t^e P_t^{sell} \tag{20}$$

需求响应成本为

$$C_{dr}^{RIES} = \sum_{t \in T} c_{dr}^e P_{\text{tran}}^t \tag{21}$$

式中　C_{dr}^{RIES}——需求相应成本

$C_{\text{buy}}^{\text{grid}}$、$C_{\text{sell}}^{\text{grid}}$——电网购电成本、售电收益

c_t^e——t 时段电网电价

P_t^{sell}——t 时段系统的售电量

c_{dr}^e——单位响应功率的补偿价格

2.2.2　下层模型约束条件

（1）功率平衡

系统需满足电、热平衡，约束为

$$P_{PV}(t) + P_t^{buy} + P_{BES,D}(t) = P_{load}(t) + P_{BES,C}(t) + P_{\text{tran}}(t) + P_{AHP}^e(t) \tag{22}$$

$$P_{AHP}^h(t) + Q_{BDG}(t) + P_{HST,D}(t) + Q_{PPG}^t(t) = Q_{Load}(t) + P_{HST,C}(t) \tag{23}$$

式中　$P_{PV}(t)$、$P_{load}(t)$——t 时刻光伏发电量、系统电负荷

$P_{BES,C}(t)$、$P_{BES,D}(t)$——t 时刻电池的充、放电量

$P^{e}_{AHP}(t)$、$P^{h}_{AHP}(t)$——t 时刻 AHP 的耗电量、产热量

$Q_{BDG}(t)$、$Q^{t}_{PPG}(t)$——t 时刻 BDG、PPG 的产热量

$P_{HST,C}(t)$、$P_{HST,D}(t)$——t 时刻 HST 的储热、放热量

$Q_{Load}(t)$——t 时刻系统热负荷

(2)储能约束

储能系统的充放电约束为

$$0 < R_{BES,C} + R_{BES,D} < 1 \tag{24}$$

$$E^{\min}_{SOC} \leqslant E_{SOC}(t+1) \leqslant E^{\max}_{SOC} \tag{25}$$

式中 $R_{BES,C}$、$R_{BES,D}$——电池充、放电状态变量

$E^{\min}_{SOC}$、$E^{\max}_{SOC}$——电池充放电量的下、上限

(3)电网购电功率约束

电网购电功率上下限约束为

$$P^{buy}_{\min} \leqslant P^{buy}_{t} \leqslant P^{buy}_{\max} \tag{26}$$

式中 $P^{buy}_{\max}$、$P^{buy}_{\min}$——t 时刻电网购的上限、下限

2.3 规划模型求解

模型求解通过构建上层规划模型和下层运行模型进行计算,上层规划模型的周期为 1 a,下层运行模型的运行周期为 1 d,时间颗粒度为 1 h。上层规划模型以年折算的经济成本、碳排放量目标函数,通过 NSGA-Ⅱ算法[22]获得多目标解集;下层模型使用商业求解器 Gurobi 进行求解,每个典型日运行结果乘以相应时长(以天为单位),将所得全年的运行结果反馈至上层,通过上下层的优化迭代最终求得全局最优解。具体求解流程如图 3 所示。

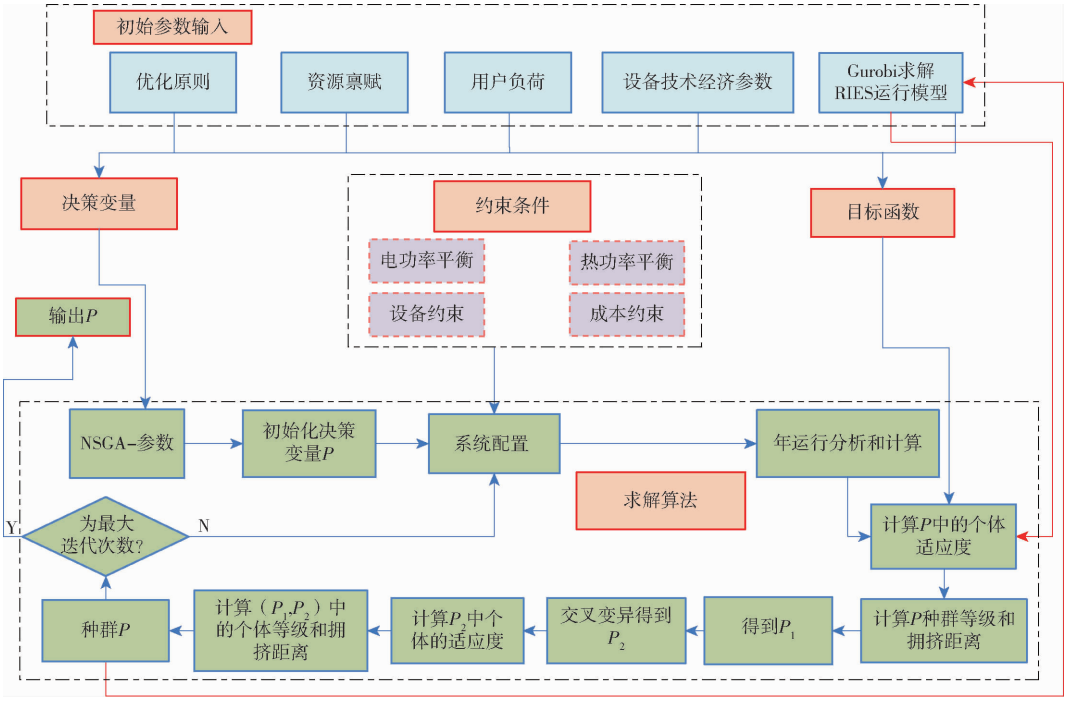

图 3 规划模型求解流程图

Fig. 3 Solving process of planning models

3 算例分析

3.1 基础数据

本文选用我国东北某农场进行仿真模拟。农田总面积 1 666.67 hm^2,林业总面积 2 333.3 hm^2,太阳能与生物质资源丰富,每公顷耕地消耗柴油量为 81.45 kg,考虑到农机使用时间的复杂性,为了简化计算减少变量,本案例结合历史负荷数据,选择 3 个典型日进行研究分析:冬季典型日为 10 月 15 日到次年 4 月 14 日,共 180 d;夏季典型日为 6 月到 8 月,共 92 d;过渡季典型日为其余时段,共 93 d。各典型日的电热负荷需求和光照强度如图 4a ~ 4c 所示。综合能源系统规划设备基本数据参考文献[23 - 25],如表 1 所示。该算例采用的分时电价如图 4d 所示。

3.2 农机负荷处理

案例农场所使用的传统农业机械的具体状况见表 2。为简化计算,假定电动农业机械在额定功率和速度下运行。拖拉机的工作参数取自文献[26]和相关资料。通过式(7)可以计算得到电动农业机械的年电力负荷,如图 5 所示。

3.3 系统优化配置方案

为验证本文中考虑电动农机的农村综合能源系统的有效性,设置 4 个场景进行对比分析。

场景 1:RIES(光伏系统 + 光热系统 + 生物质直燃系统 + 空气源热泵系统 + 储能系统) + 电动农机 +

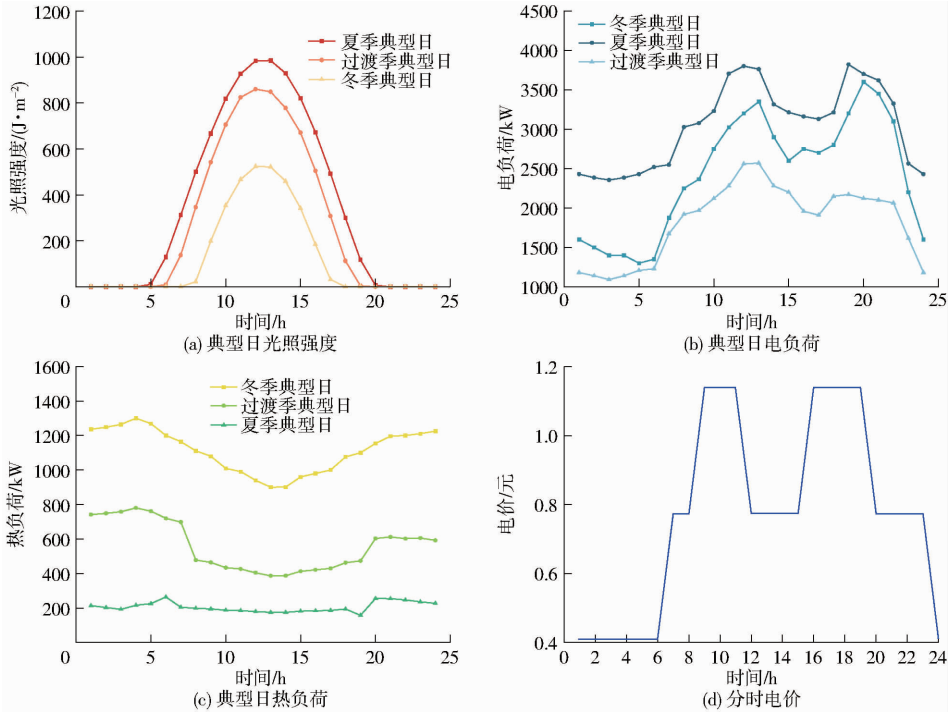

图 4　基本数据

Fig. 4　Basic data

表 1　设备基础数据

Tab. 1　Basic equipment data

设备	参数	数值	设备	参数	数值
PV	单价/(元·m⁻²)	2 000	PPG	单价/(元·m⁻²)	1 000
	单位维护成本/(元·kW⁻¹)	0. 36		单位维护成本/(元·kW⁻¹)	0. 36
	制热性能指数	0. 188		制热性能指数	0. 8
	使用寿命/a	20		使用寿命/a	20
BES	单价/(元·kW⁻¹)	1 800	HST	单价/(元·kW⁻¹)	1 000
	单位维护成本/(元·kW⁻¹)	0. 36		单位维护成本/(元·kW⁻¹)	0. 36
	使用寿命/a	10		使用寿命/a	10
AHP	单价/(元·kW⁻¹)	1 000	BDG	单价/(元·kW⁻¹)	1 000
	单位维护成本/(元·kW⁻¹)	0. 82		单位维护成本/(元·kW⁻¹)	0. 36
	制热性能指数	4. 5		制热性能指数	0. 95
	使用寿命/a	20		使用寿命/a	20

表 2　案例中农机种类与数量

Tab. 2　Types and quantities of agricultural machinery in case

农机类型	功率/kW	单价/元	数量/辆
拖拉机	111. 85	1.5×10^5	50
收获机	111. 85	1.5×10^5	35
小型弥雾机	18. 64	5×10^4	25
水稻插秧机	18. 64	5×10^4	75

农业柔性负荷。场景 2:RIES(光伏系统 + 光热系统 + 生物质直燃系统 + 空气源热泵系统 + 储能系统)和电动农机。场景 3:农村综合能源系统(光伏系统 + 光热系统 + 生物质直燃系统 + 空气源热泵系统 + 储能系统)和传统农机。场景 4:传统农机和不考虑农村综合能源系统。

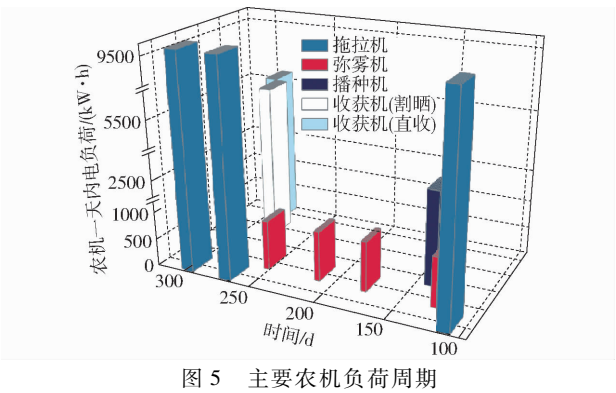

图 5　主要农机负荷周期

Fig. 5　Main agricultural machinery load cycle

4　结果与讨论

4.1　农业柔性负荷优化分析

在下层优化中,对系统中可作为柔性负荷的

补光灯和灌溉设备的负荷分布以系统运行成本最低进行了优化,图 6 为夏季典型日优化前后负荷分布。

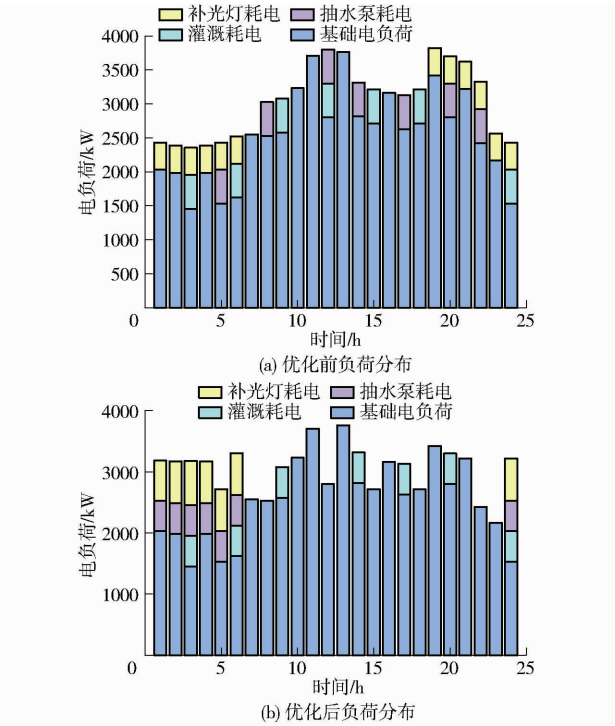

图 6 优化前后负荷分布情况

Fig. 6 Load distribution before and after optimization

从图 6a 可以看出,在对柔性负荷进行优化前,补光灯、抽水泵以及灌溉设备的工作时间大多分布在电价峰时,这加大了系统运行成本。从图 6b 可以看出,在进行了负荷优化之后,可以看到补光灯的能源消耗主要集中在电价低谷的时段。抽水泵的操作也被调整至低电价时期进行蓄水作业,确保了蓄水池维持适当的水量。灌溉设备则在不影响作物所需水分供给周期的情况下,尽可能避免在电价高峰时段运行。经过优化调整后,整个系统在高电价时段的购电量减少,有效地降低了系统的运营成本。

4.2 规划结果与典型日分析

4.2.1 系统配置规划结果

经过双层规划,4 种场景的总成本、运行成本和总碳排放量如表 3 所示,前 3 种场景的规划配置如表 4 所示。同时,由于电动农机普及率较低,市场价格不确定,本案例以传统农机市场价格购入,通过

表 3 不同方案的优化目标

Tab. 3 Optimization objectives of different plans

场景序号	总成本/元	运行成本/元	总碳排放量/g
1	1.12×10^{7}	7.12×10^{6}	8.13×10^{9}
2	1.23×10^{7}	7.69×10^{6}	8.50×10^{9}
3	1.65×10^{7}	1.22×10^{7}	9.52×10^{9}
4	1.84×10^{7}	1.84×10^{7}	1.52×10^{10}

表 4 不同场景下设备配置规划

Tab. 4 Configuration planning of devices in different scenarios

场景序号	PV 安装面积/m^2	PPG 安装面积/m^2	HST 容量/kW	BES 容量/kW	BDG 容量/kW	AHP 容量/kW
1	27 060	2 503	1 518	3 285	750	600
2	26 446	2 391	1 619	3 148	750	600
3	22 088	2 050	1 500	2 580	750	600

式(13)可以计算得到农机年化购入成本为 2.66×10^{6} 元。

由表 3 可以看出,场景 4 由于使用传统的能源系统进行满足负荷,需要从电网购入大量电能,因此系统的总成本、运行成本以及总碳排放量都大于前 3 个场景,与场景 2 相比,场景 3 的 RIES 虽然利用了太阳能和生物质资源,但由于没有使用电动农机,系统对新能源资源的利用率降低,增加了对传统能源的依赖,同时使用传统化石燃料驱动农机不仅增加了运行成本,还提高了碳排放。场景 2 与场景 3 相比总成本显著降低,这是由于 EAM 参与 RIES 交互,并为电网提供辅助服务,使农闲季节系统的收入增长。此外,农业机械的电能替代减少了柴油消耗和整体碳排放。在不考虑电动农机购入成本的条件下场景 1 相比于场景 2 总成本降低 8.9%,运行成本降低 7.4%,是由于考虑了农业柔性负荷,采用需求响应引导用户在电价低谷时进行农业生产,调整电负荷时空分布,同时增加了新能源设备输出功率。在不考虑电动农机购入成本的条件下场景 1 总投资成本与场景 3 和 4 相比分别降低了 32% 和 39%,在考虑电动农机购入成本的条件下,场景 1 总投资成本与场景 3 和 4 相比分别降低了 15% 和 24%。总碳排放量与上述 3 种情景相比分别下降了 4%、14.6% 和 46%。

表 4 展示了 3 个场景的设备规划结果。分析表明,与场景 2 相比,场景 1 通过优化农业柔性负荷,提升了系统对太阳能资源的利用效率,具体表现为光伏容量增加。同时,该场景通过优化农业用电模式和时间安排,进一步提高了储能系统的利用效率,储能电池容量也相应增加。相比之下,场景 3 由于未采用电动农机,系统对新能源资源的利用率降低,光伏和储能容量均有所减少。

4.2.2 典型日运行结果分析

根据不同季节选取了有无电动农机参与的典型日,分析对比了夏季与冬季典型日电热系统的运行状态。

图 7a 和图 7b 为夏季农闲时期和冬季农忙时期的电系统运行策略。在农闲时,农机电池参与 RIES

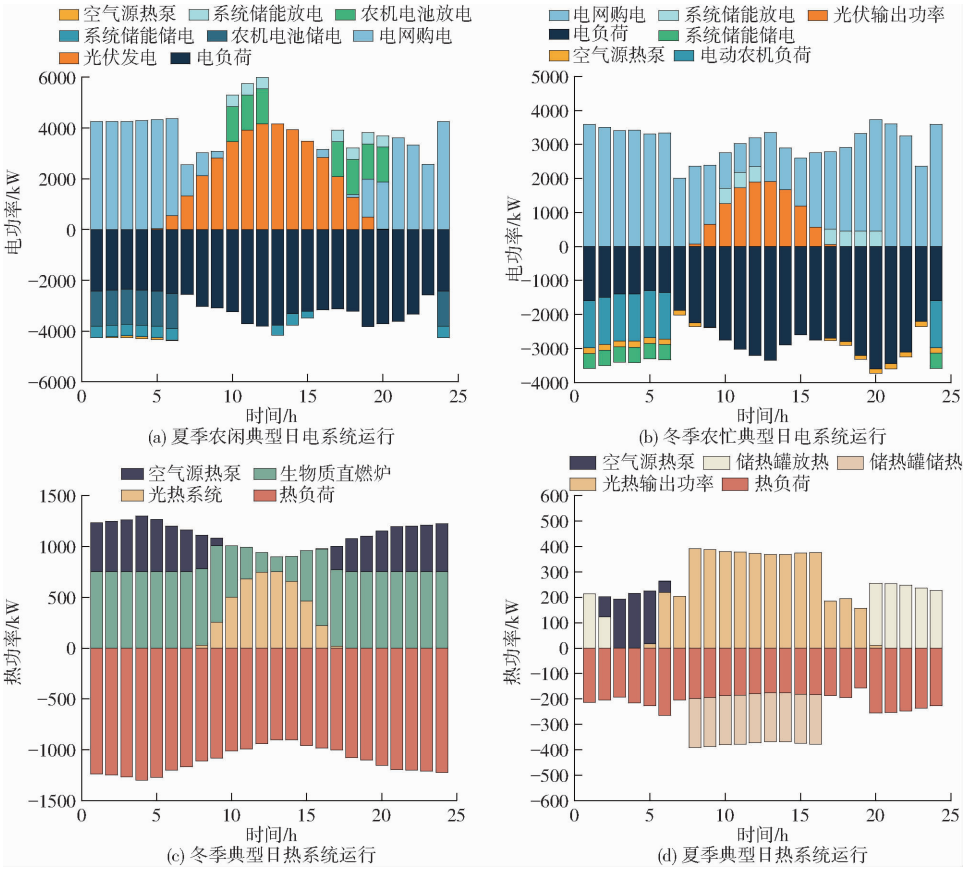

图 7　典型日运行调度图

Fig. 7　Typical daily operation schedule

运行,在电价低谷时,向电网购电以满足电力负荷、农机电池、系统蓄电池和空气源热泵的需求。在电价高峰期,农机电池和系统蓄电池放电满足电力负荷,向电网售电。在农忙时,系统在电价低时向农机电池充电,以确保农业机械的正常运行。

图 7c 和图 7d 为冬季和夏季典型日热系统运行图。冬季 RIES 的热负荷主要由太阳能集热器和生物质直燃锅炉满足。当热负荷需求不足时,由空气源热泵补充。当供热超过热负荷时,储热系统储存太阳能集热器和生物质直燃锅炉产生的多余热量。在高电价期间释放这些储存的热量,以减少空气源热泵的电力消耗。夏季 RIES 的热负荷需求主要由太阳能集热器和储热罐满足。

5　结论

(1)当农业柔性负荷参加需求响应后,从负荷分布可知,灵活调度农业柔性负荷能有效实现电力负荷的优化,减少系统的运行成本,提高系统经济性。

(2)多组算例对比分析表明,考虑 EAM 的 RIES 可以增加居民收益,降低运行成本,减少系统碳排放,同时 EAM 参与 RIES 交互,为电网提供辅助服务,进一步提升系统的运行效率和可持续性。

(3)对不同典型日电热系统运行状态的分析结果显示,通过下层运行模型的优化,系统内各设备能够以更加经济、协调的模式运行,能更好地满足系统负荷需求。

参　考　文　献

[1] 申瑞霞, 姚宗路, 赵立欣, 等. 双碳背景下黑龙江省农村生活用能研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 377 – 383.
SHEN Ruixia, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Rural living energy in Heilongjiang Province under background of carbon peak and neutrality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 377 – 383. (in Chinese)

[2] 冯凯辉, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 中国农村能源发展关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 1 – 8.
FENG Kaihui, LI Qionghui, HUANG Bibin, et al. Key issues on rural energy development in China[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 1 – 8. (in Chinese)

[3] 郑陈亮. 中国农户能源使用情况研究综述[J]. 轻工科技, 2021, 37(5): 102 – 104, 181
ZHENG Chenliang. A review of research on energy use among Chinese farmers[J]. Light Industry Science and Technology 2021, 37(5): 102 – 104, 181. (in Chinese)

[4] WANG R, ZHANG Y, ZOU C. How does agricultural specialization affect carbon emissions in China? [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133463.

[5] WU C, LI D, ZHANG X, et al. China's agricultural machinery operation big data system[J]. Computers and Electronics in

Agriculture, 2023, 205: 107594.
[6] GAO D, ZHI Y, YANG X. Assessing carbon emission reduction benefits of the electrification transition of agricultural machinery for sustainable development: a case study in China[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 63: 103634.
[7] WU S. The evolution of rural energy policies in China: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109584.
[8] KANG Z, DUAN R, ZHENG Z, et al. Grid aided combined heat and power generation system for rural village in North China Plain using improved PSO algorithm[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 435: 140461.
[9] 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, 399.
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(Supp. 2): 350 - 358, 399. (in Chinese)
[10] 杜松怀, 孙若男, 杨曼, 等. 光伏扶贫农村综合能源站设计与优化配置方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 367 - 376.
DU Songhuai, SUN Ruonan, YANG Man, et al. Optimal allocation method of rural integrated energy station under background of photovoltaic poverty alleviation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 367 - 376. (in Chinese)
[11] 李利桥, 高宗余, 聂晶. 电动拖拉机混合电源负载自适应能量管理策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 459 - 469.
LI Liqiao, GAO Zongyu, NIE Jing. Load-adaptive energy management strategy for electric tractor based on hybrid power source[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 459 - 469. (in Chinese)
[12] 刘浩鲁, 沈成, 胡良龙, 等. 电动农业装备研究进展与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 39 - 51.
LIU Haolu, SHEN Cheng, HU Lianglong, et al. Research progress and development trend of electric agricultural equipment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23): 39 - 51. (in Chinese)
[13] GORJIAN S, EBADI H, TROMMSDORFF M, et al. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: a solution for sustainable farm operations[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126030.
[14] GÖTZ K, ROSNER P, FROISSART I, et al. The potential of electric agriculture and mobility for the least-cost rural electrification strategy in Sub-Saharan Africa[J]. Energy for Sustainable Development, 2024, 83: 101581.
[15] GAO D, ZHI Y, YANG X. Assessing carbon emission reduction benefits of the electrification transition of agricultural machinery for sustainable development: a case study in China[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 63: 103634.
[16] 商高高, 刘刚, 韩江义, 等. 园艺电动拖拉机作业全覆盖路径规划算法研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(9): 35 - 40.
SHANG Gaogao, LIU Gang, HAN Jiangyi, et al. Research on complete coverage path planning of gardening electric tractor operation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(9): 35 - 40. (in Chinese)
[17] 陈黎卿, 詹庆峰, 王韦韦, 等. 纯电动拖拉机电驱动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 388 - 394.
CHEN Liqing, ZHAN Qingfeng, WANG Weiwei, et al. Design and experiment of electric drive system for pure electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 388 - 394. (in Chinese)
[18] LI L, LIU Q. Acceleration curve optimization for electric vehicle based on energy consumption and battery life[J]. Energy, 2019, 169: 1039 - 1053.
[19] 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.
JIANG Dewei, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. Integrated energy system planning for agricultural industrial parks considering biomass energy and agricultural flexible load[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1836 - 1845. (in Chinese)
[20] 郭小璇, 罗鸿轩, 郭敏, 等. 计及需求响应的补光农业果园综合能源系统的两阶段调度[J]. 控制工程, 2024, 31(11): 1972 - 1978.
GUO Xiaoxuan, LUO Hongxuan, GUO Min, et al. Two-stage scheduling of integrated energy systems for agricultural orchards with supplemental lighting considering demand response[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(11): 1972 - 1978. (in Chinese)
[21] 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.
WANG Yongli, HAN Xu, LIU Chen, et al. Rural electricity - heat integrated energy system planning based on coupling utilization of biomass and solar resources[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 1 - 14. (in Chinese)
[22] 李东东, 汪露璐, 王维, 等. 考虑源荷互动的综合能源系统多目标双层规划[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 527 - 542.
LI Dongdong, WANG Lulu, WANG Wei, et al. Multi-objective bi-level planning for integrated energy systems considering source-load interaction[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 527 - 542. (in Chinese)
[23] WANG Y, HUANG F, TAO S, et al. Multi-objective planning of regional integrated energy system aiming at exergy efficiency and economy[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118120.
[24] 杨志豪, 苗世洪, 涂青宇, 等. 考虑多品位能源互补的综合能源系统分级规划策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1457 - 1467.
YANG Zhihao, MIAO Shihong, TU Qingyu, et al. Hierarchical planning strategy for integrated energy system considering the complementation of multi-grade energy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1457 - 1467. (in Chinese)
[25] 王瑞琪, 王新立, 郭光华, 等. 农村光-氢-沼储能综合能源系统建模与鲁棒优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 89 - 98.
WANG Ruiqi, WANG Xinli, GUO Guanghua, et al. Modeling and robust optimal dispatch of rural integrated energy system considering PV - hydrogen - methane energy storage characteristics[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 89 - 98. (in Chinese)
[26] 商高高, 陈鹏, 韩江义, 等. 基于最佳能耗的电动拖拉机多作业点路径规划算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(5): 50 - 57.
SHANG Gaogao, CHEN Peng, HAN Jiangyi, et al. Research on path planning algorithms for multi-operating points of electric tractors based on optimal energy consumption[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(5): 50 - 57. (in Chinese)