

基于负荷划分的农业园区储能优化配置研究

程 龙¹, 邱 爽¹, 章子谦¹, 韩 冰², 刘 路¹, 宋 延³

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 合肥 230601;

3. 国网黄山供电公司, 黄山 245000)

摘 要: 针对农业园区新型电力系统中发电侧功率波动以及用电侧负荷需求多样化、不确定导致的系统运行稳定性差和综合经济效益低等问题, 构建一种基于负荷划分的储能容量优化配置模型。首先, 依据负荷划分确定两阶段储能配置策略, 针对常规负荷需求优先由光伏出力补充, 分析不平衡功率, 采用均方根(RMS)包络技术平抑波动功率; 其次, 针对农业负荷需求, 构建净现值(NPV)为经济优化目标函数, 以分时电价策略激励储能容量实现削峰填谷、消纳补偿; 最后, 以某农业园区夏、冬两季数据为例, 且以粒子群算法为优化工具, 得到两阶段优化配置结果: 夏、冬两季负荷整体功率波动分别下降约32%和27%, 负荷峰谷差率分别下降13.1%、14.4%, 储能综合经济收益相较于直接配置方法提高21%。算例验证了所提方法能有效降低微电网功率波动问题, 提高储能配置带来的综合经济收益。

关键词: 光伏功率; 功率流优化; 储能; 农业园区; 负荷划分; 分时电价

中图分类号: TM732

文献标志码: A

0 引 言

光伏能源本身固有的随机波动性和间歇性给农业园区微电网的稳定运行带来严峻挑战^[1]。农业负荷类型复杂多样, 功率需求差异显著, 导致园区系统在电力供需匹配上出现失衡, 影响光伏能源的消纳水平^[2-3]。由于储能项目投资建设成本高、回收周期长, 单方面追求更大的配置容量可快速满足负荷需求, 但这也意味着在储能有限的寿命周期内, 需投入更高的建设成本和运行维护成本。因此, 配置合理的储能容量不仅能有效弥补发电侧和用电侧存在的不确定性, 还可实现削峰填谷套现收益, 提升农业园区微电网系统的运行可靠性和经济性, 为园区的稳定发展提供有力保障^[4-5]。

园区用电侧负荷不仅包括居民生活所需的常规负荷, 还包括用于作物生产、加工的各类可时移农业负荷^[6]。常规负荷具有相对稳定的用电模式和较低波动性, 不具备可调节性, 功率曲线多呈正态分布^[7]; 农业负荷功率波动大, 用电模式多与生产活动密切相关, 具有较大弹性和不确定性^[8]。负荷的多样化迫使农业微电网在系统灵活性方面要求增强, 供电经济性、可靠性不平衡等问题愈加突出^[9-10]。文献[11]针对园区微电网中农业负荷可时移特性, 提出基于区块链技术的运行控制策略, 虽然提高了对光伏的消纳水平, 但缺乏经济指标的决策分析; 文献[12]依据用电侧柔性负荷特性, 以

综合成本最小为经济性优化目标, 但忽略了光伏固有波动特性对系统功率平衡的影响分析。上述研究仅考虑储能配置优化对单一目标(如经济性/能源利用)的影响, 在面对发电侧和用电侧的多目标应用时其配置方法就难以满足需求。因此, 综合多目标优化配置储能系统受到更多关注^[13]。文献[14]为平抑风电波动和参与辅助调频协调运行的多场景优化配置问题, 提出基于哈里斯鹰算法的多场景协调配置方法, 虽然有效提高了系统的运行稳定性, 但缺乏对负荷类型的差异化建模分析; 文献[15]构建了“新能源-电网-用户侧”双层优化模型, 以“寿命周期成本最小+净收益最大”为目标函数, 考虑容量共享机制, 有效提高了储能的容量利用率和经济收益, 但算例中更侧重于用电侧的共性负荷分析, 忽略了弹性负荷随机性波动对系统稳定性的影响; 文献[16]考虑了负荷重要度与分布式电源接入, 以“故障经济损失期望+FTU投资成本”为目标优化储能配置, 侧重于配电网的经济优化, 但对传统负荷重要度分类, 缺乏经济性和可靠性的协同优化。

针对上述问题, 本文立足于农业园区微电网, 提出基于负荷划分的两阶段储能优化配置模型。首先, 通过均方根(root mean square, RMS)包络技术平抑常规负荷与光伏的功率波动, 保障园区系统的运行可靠性; 其次, 针对农业负荷的可调节特性, 结合分时电价, 利用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)求解储能最优容量, 满足经济性需

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目(2408085MC065); 高节能电机及控制技术国家地方联合工程实验室开放课题(KFKT202204);

安徽农业大学人才科研资助项目(RC412108)

通信作者: 程 龙(1988—), 男, 博士、讲师, 主要从事综合能源方面的研究。cl@ahau.edu.cn

求。综上,相较现有研究,本文将不同负荷的特性需求划分与储能的平抑波动和削峰填谷功能进行耦合,以期为农业园区源-储-荷资源的高效整合提供新的路径。

1 农业园区微电网系统概述

1.1 农业园区微电网

图1为农业分布式光伏的微电网系统基础结构^[17]。具有如下特征:1)考虑农业园区用电侧负荷差异性,依据需求特性划分为常规负荷和农业负荷;2)微电网内引入多种能源设备(如光伏、储能),可实现多种能源横向互补,增加系统灵活性,实现内部功率供需平衡;3)微电网与外部公共电网母线联结,构建并网型拓扑结构。

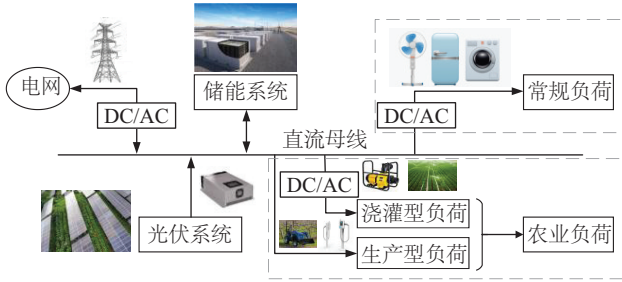


图1 农业园区微电网基础结构

Fig. 1 Agricultural park microgrid basic block diagram

1.2 用电负荷系统分析

农业园区负荷(常规负荷/农业负荷)在需求区间分布及功率特征上存在明显差异,这使得新型微电网系统的供需两侧呈现出高度不确定性^[18],系统平衡模式也从“确定性发电跟踪不确定负荷”转变为“不确定发电与不确定负荷双向匹配”。

1.2.1 常规负荷

用于日常生活办公的常规负荷。在用电需求区间分布上,该类负荷大多集中在白天时段,具备相对稳定的用电模式;在功率特征变化上,常规负荷功率曲线呈现出正态分布的特征,多为刚性负荷,不可调控。基于此特性,可通过对历史功率数据进行分析,从而准确地获取典型日常规负荷功率曲线,能更好地预测和规划此类负荷的用电需求,为后续模型配置奠定基础。

1.2.2 典型农业负荷

农业园区除日常生活负荷外,用于生产、加工等农业负荷类型占比更大,其用电需求的区间分布与园区内的生产活动紧密相连,存在较大的弹性和不确定性。在功率特征变化上,农业负荷随生产活动变化,具有较大的波动性、季节性以及可时移性等,多为柔性负荷。因此,本节基于物理过程建模及蒙特卡洛等方法构建排灌型和电动农机充电型两类典型农业负荷数学模型。

1)排灌型负荷受天气、温度及作物需水量等因素影响,

其水泵电机需求功率呈现出随机性特点^[19]。因此,通过排灌用水量的变化建立电排灌负荷模型,可准确把控功率需求变化,实现高效能源的合理调配。

$$P_{pg}(t) = Q_w(t)\eta \quad (1)$$

$$Q_w(t) = A \sum_{i=1}^n K_c (L_{ET0} - L_c) \quad (2)$$

$$L_{ET0} = 0.0023(T_m + 17.8)(T_x - T_n)^{0.5} R_a \quad (3)$$

式中: $P_{pg}(t)$ ——电排灌系统电负荷功率,kW; $Q_w(t)$ ——排灌用水量, m^3 ; η ——电排灌系统的效率系数; A ——作物种植面积, m^2 ; K_c ——作物系数; L_c ——有效降水量,mm; L_{ET0} ——Hargreaves公式^[20]参考蒸散量,(MJ/ m^2)/d;0.0023——经验系数; T_m 、 T_x 、 T_n ——日均温度、日内最高和最低温度, $^{\circ}C$; R_a ——外界光照辐射量。

2)农业园区电动农机充电负荷,其充电功率在时间上具有很大的随机性、季节性,受影响因素多,因此通过蒙特卡洛法建立数学模型可模拟农机充电功率变化。

定义农机工作初始荷电状态 S_0 服从均匀分布,概率密度函数为:

$$f(S_0) = \frac{1}{b-a} \quad (4)$$

式中: b 、 a ——农机初始荷电状态 S_0 的上下限。

农机日内运行工作时间 T_1 服从正态分布,其概率密度函数为:

$$f(T_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(T_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (5)$$

式中: μ_1 、 σ_1 ——农机工作时间 T_1 的均值和标准差。

根据农机的初始荷电状态 S_0 和运行工作时间 T_1 ,可求得农机充电前的剩余荷电状态 S_1 为:

$$S_1 = S_0 - \frac{T_1 E_h}{E_H} \quad (6)$$

式中: E_h ——农机每小时耗电量,kW·h; E_H ——农机电池容量,kW·h。

根据充电前剩余荷电状态 S_1 和充电桩充电效率,计算农机所需充电时长 T_c :

$$T_c = \frac{(1 - S_1) E_H}{\eta_{ev} P_{ev}} \quad (7)$$

式中: η_{ev} ——农机充电效率; P_{ev} ——农机充电桩额定充电功率,kW。

确定充电时长 T_c ,计算第 k 辆农机在 t 时段内的充电负荷需求功率 $P'_{c,k}$,并将所有农机在 t 时段充电负荷叠加得到该时间段内所有农机的总负荷功率 $P'_{c,K}$ 。

$$P'_{c,K} = \sum_{k=1}^K P'_{c,k} \quad (8)$$

式中: K ——园区农机数量,辆。

由式(4)~式(8)计算可得农业园区典型日农机充电负荷功率曲线。

2 储能容量配置优化模型

农业园区负荷兼具“常规负荷稳定性”与“农业负荷可调性”,传统配置方法无法兼顾可靠性与经济性,因此本文提出“负荷划分”。针对常规负荷采用 RMS 包络技术平抑光伏波动(解决运行可靠性),针对农业负荷结合分时电价与 PSO 优化储能容量(提升经济性),构建“先技术后经济”的两阶段模型,通过负荷特性差异实现储能功能精准匹配,为农业负荷特性与储能策略的耦合研究提供研究思路。

2.1 运行可靠性优化

2.1.1 目标函数

针对发电侧分布式光伏固有特性导致的系统运行稳定性差问题进行波动平抑处理。第一阶段运行可靠性最优准则以微电网系统净负荷功率均方根为目标函数。当目标函数越小时,储能系统的充放电频率和幅度会降低,储能系统需应对的功率波动相应减少,园区微电网系统的运行可靠得到提高。

$$f_1 = \min(F_R) \quad (9)$$

$$F_R = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{net}}(t))^2} \quad (10)$$

$$P_{\text{net}}(t) = P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{load}}(t) \quad (11)$$

式中: F_R ——净负荷功率的均方根函数,物理意义是衡量净负荷功率波动程度; $P_{\text{net}}(t)$ —— t 时刻净负荷功率,其在数值上等于光伏出力 and 常规负荷需求的不平衡功率,又称缺额率,kW; $P_{\text{pv}}(t)$ ——光伏在 t 时刻的出力功率,kW; $P_{\text{load}}(t)$ —— t 时刻农业园区常规负荷需求功率,kW。

2.1.2 约束条件

为确保储能系统安全经济运行,需考虑对荷电状态、充放电功率以及初始成本进行约束。

1) 储能电池荷电状态约束

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \quad (12)$$

式中: $S(t)$ ——储能系统在 t 时刻的充放电的荷电状态,定义为能量存储量与储能实际额定容量的比值; $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ ——储能最大和最小荷电状态,为防止储能过充过放,定义荷电状态取值区间为 0.2~0.9。

2) 储能电池充放电功率约束

$$-P_{c,\max} \leq P_{\text{ess}}(t) \leq P_{c,\max} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{ess}}(t)$ ——储能系统在 t 时刻的充放电功率,kW; $P_{c,\max}$ 、 $-P_{c,\max}$ ——储能系统的最大充电功率和最大放电功率,kW。

3) 初始建设成本约束

平抑净负荷功率波动所需储能容量,在满足运行可靠性的条件下初始建设成本应最小。

$$C_{\text{net}} \geq C_R \quad (14)$$

式中: C_{net} ——平抑净负荷功率波动所需储能成本,元; C_R ——

满足最低可靠性阈值成本,元。

2.2 经济性优化

2.2.1 目标函数

针对农业园区用电侧负荷需求多样化、不确定导致微电网综合经济收益低的问题,建立储能寿命周期内净现值最大为目标函数,采用粒子群算法进行迭代更新,配置合理储能容量。

$$f_2 = \max(F_e) \quad (15)$$

$$F_e = \sum_{n=1}^N \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} - C_{\text{ic}} \quad (16)$$

$$B_n = B_{n,\text{sw}} + B_{n,\text{lg}} + B_{n,\text{bt}} \quad (17)$$

$$C_n = C_{n,\text{yw}} Q_{n,\text{ess}} \quad (18)$$

式中: F_e ——净现值函数,物理意义为储能系统在整个运行周期内的收益减去成本后的现值,净现值越大代表储能系统的投资建设回报越好; N ——储能正常运行时限,a; B_n ——第 n 年的总收益,主要包括第 n 年的余电上网销售收入 $B_{n,\text{sw}}$ 、削峰填谷收益 $B_{n,\text{lg}}$ 以及国家补贴收益 $B_{n,\text{bt}}$,元; C_n ——第 n 年的储能运营维护总费用成本,元; r ——贴现率,%; C_{ic} ——储能初始建造投资成本,元; $C_{n,\text{yw}}$ ——第 n 年单位发电量储能运维成本,元; $Q_{n,\text{ess}}$ ——第 n 年储能年发电量,kW·h。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{\text{NET}}(t) + P_{\text{DC}}(t) = P_{\text{LOAD}}(t) + P_{\text{ESS}}(t) \quad (19)$$

式中: $P_{\text{NET}}(t)$ —— t 时刻平抑后净负荷功率,kW; $P_{\text{DC}}(t)$ —— t 时刻微电网与电网联络线功率,kW; $P_{\text{LOAD}}(t)$ —— t 时刻农业负荷需求功率,kW; $P_{\text{ESS}}(t)$ —— t 时刻储能充放电功率,kW。

2) 配储比例约束

储能系统的配置规模应满足新能源项目强制配储比例的需求^[21],即原则上不低于新能源项目总装机容量的 10%。

$$\begin{cases} P_{\text{ESS}} \geq 10\% P_z \\ P_{\text{ESS}}^{\min} \leq P_{\text{ESS}} \leq P_{\text{ESS}}^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{ESS} ——储能系统的配置功率,kW; $P_{\text{ESS}}^{\max}$ 、 $P_{\text{ESS}}^{\min}$ ——储能系统的配置功率上下限,kW; P_z ——分布式光伏的总装机容量,kW。

储能系统的额定容量与额定功率的关系为:

$$E_{\text{ESS}} = P_{\text{ESS}} t_{\text{ESS}} \quad (21)$$

式中: t_{ESS} ——储能系统额定功率下连续储能时长,h。

2.3 量化评估指标

为更好地描述配置储能容量对微电网系统运行可靠性以及经济性的影响效果,引入以下量化评估指标。

2.3.1 运行可靠性量化指标

定义功率波动率作为系统运行可靠性评估标准,根据 GB/T 19964—2012《光伏发电站接入电力系统技术》规定得知,光伏发电有功功率变化速率应满足电力系统安全稳定运

行要求,功率波动率 λ 为^[22]:

$$\lambda = \frac{\max P(t) - \min P(t)}{P_z} \times 100\% \quad (22)$$

$$\lambda \leq \lambda_1 = 10\% \quad (23)$$

式中: $\max P(t)$ 、 $\min P(t)$ ——特定时间内光伏功率的最大值和最小值; λ_1 ——满足功率波动率要求的阈值标准^[23]。

为了更明显地展示波动率的平抑变化,引入阈值占比分析,计算公式为:

$$\begin{cases} R_a = \frac{r_a}{r_t} \\ R_b = \frac{r_b}{r_t} \end{cases} \quad (24)$$

式中: R_a 、 R_b ——在特定时间内波动率超过阈值以及未超过阈值的占比,%; r_a 、 r_b 、 r_t ——波动率超过阈值占比、未超过阈值占比以及总选取特定时间段。

定义典型日周期内功率波动率超出阈值占比可存在 5% 误差允许。

$$R_b \leq 5\% \quad (25)$$

2.3.2 经济性量化指标

对于储能运行周期内经济效益量化主要选择电力行业的专属定量指标净现值 N_{pv} 来评估。净现值是一项投资所产生的未来现金折现值与项目投资成本之间的差值,是一个综合评估储能系统长期收益的经济指标^[24]。

$$N_{pv} = \sum \frac{C_1 - C_0}{(1+i)^t} \quad (26)$$

式中: C_1 ——未来现金净流量现值,元; C_0 ——原始投资额现值,元。

3 优化模型求解

3.1 优化算法

在分布式能源系统及其储能容量的优化过程中,常见的优化算法包括粒子群优化算法、模拟退火算法、蚂蚁算法等。其中,粒子群优化算法通过跟踪个体最优和全局最优来更新自己的速度和位置,多粒子协同并行搜索使得其运算收敛速度更快,且利用数学运算模拟粒子运行,在代码逻辑上简单易实现以及优化精度更高等优点^[25]。PSO 优化算法粒子速度和位置更新公式为:

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_{besti}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{besti}^k - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (27)$$

式中: v_i^{k+1} 、 x_i^{k+1} ——第 i 个粒子在第 $k+1$ 次的迭代结果, $i=1, 2, \dots, N$, 其中 N 为粒子数量; ω ——惯性因子,当值较大时全局寻优能力强、局部寻优能力弱,值较小时全局寻优能力弱、局部寻优能力强; c_1 、 c_2 ——学习因子; p_{besti}^k 、 g_{besti}^k ——第 k 次迭代中个体和全局最优位置; r_1 、 r_2 ——介于 $(0,1)$ 之间的随机数。

考虑 PSO 的优化过程在复杂约束下可能会面临局部最优的问题,因此本文采用线性递减权值 (linearly decreasing weight, LDW) 策略来动态选取惯性因子 $\omega(t)$, 在算法中定义其典型权值一般为 $\omega_{ini}=0.9$ 、 $\omega_{end}=0.4$ 。

$$\omega(t) = \omega_{ini} - \frac{(\omega_{ini} - \omega_{end})g}{G_k} \quad (28)$$

式中: ω_{ini} ——初始惯性权值; ω_{end} ——最大迭代次数时惯性权值; g ——当前迭代次数; G_k ——最大迭代次数。

3.2 求解流程图

本文所提模型的求解算法流程如图 2 所示。两阶段模型通过储能荷电状态与功率约束形成技术衔接,以配储比例与功率平衡约束实现经济与技术协同。在方法上,利用 RMS 与蒙特卡洛法解决“波动性/随机性”问题,通过粒子群算法与分时电价结合实现容量优化。

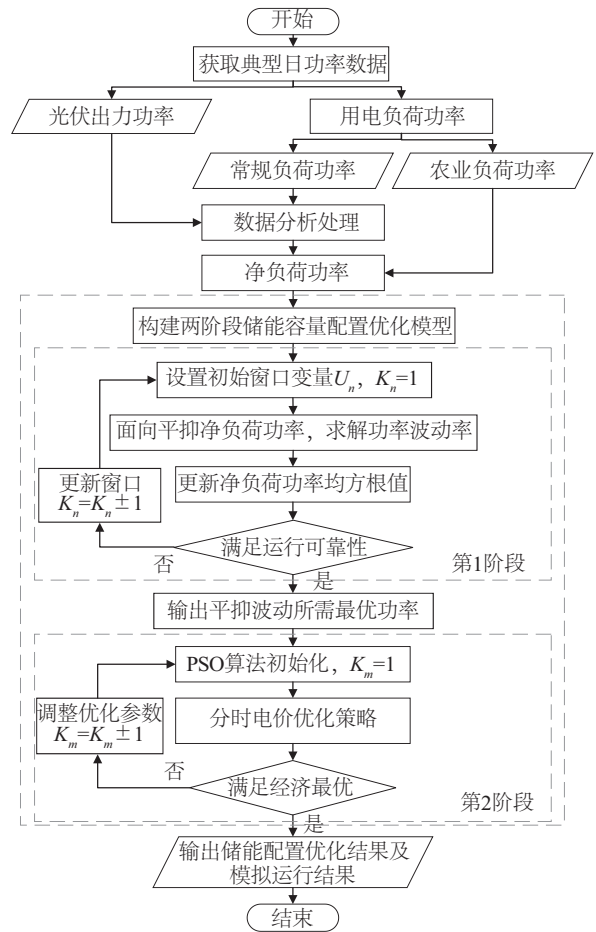


图2 求解流程

Fig. 2 Model solving flow chart

第 1 阶段可靠性优化采用线性策略求解。根据式 (23) 和式 (25) 建立可靠性量化评估指标; 面向净负荷功率波动, 设置 RMS 初始包络窗口 U_n , 以固定步长决策净负荷功率均方根大小, 调节储能平抑所需的充放电频率和幅度大小; 判断是否满足可靠性约束, 输出平抑波动所需的最优功率。

第 2 阶段储能配置经济性优化采用 PSO 算法进行求解。首先依据第 1 阶段平抑结果匹配农业负荷功率需求;其次进行算法初始化,定义粒子数量 $N=25$ 、迭代次数为 50 次、学习因子 $c_1=c_2=2$ 、惯性因子 ω 利用 LDW 策略在区间 0.4~0.9 中进行动态调整;引入分时电价策略,通过储能优化容量对差值功率进行消纳补偿,实现削峰填谷;最后在满足经济性约束条件下,更新 N_{pv} 收益,输出最优的储能容量配置结果。可靠性约束(式(12)和式(13))为经济性阶段提供储能运行边界;经济性阶段配储比例约束(式(20))反推第 1 阶段平抑所需最小容量;功率平衡约束(式(19))串联两阶段结果,使得平抑后的净负荷与农业负荷通过储能实现动态平衡。

4 算例分析

4.1 初始条件

以某地农业园区为例,取夏、冬两季度中某日光伏、常规负荷最大功率作为典型日数据,采样间隔为 1 h、采样周期为 1 d。分析图 3 可知,在夏季典型日中,光伏功率最高可达 6.39 MW;冬季典型日内光伏功率最大值为 4.58 MW;夏季典型日常规负荷最大需求功率为 3.75 MW,最小需求功率为 0.75 MW;冬季典型日最大需求功率为 3.6 MW,最小需求功率为 0.5 MW。鉴于常规负荷多应用于农业园区的日常生活,因此夏、冬两季在该类负荷需求上差异并不显著。

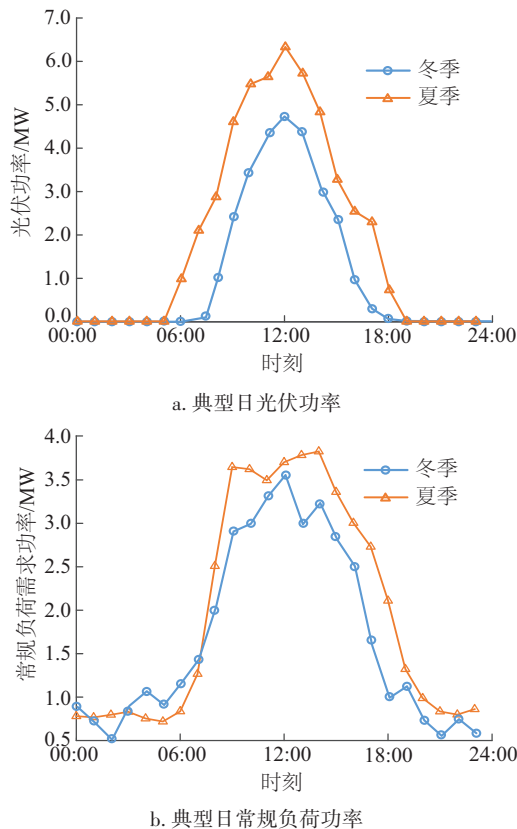


图 3 夏、冬两季典型日功率曲线

Fig. 3 Typical daily power curves in summer and winter

由式(1)、式(8)负荷模型结合附录 A 表 A1 浇灌型和生产型农业负荷参数推导可得园区夏、冬两季农业负荷累加功率曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,受季节影响,园区内夏、冬两季典型日农业负荷功率需求差异显著。夏季农业负荷日内最大需求功率为 4.1 MW、最小需求功率为 0.9 MW;冬季农业负荷日内最大需求功率为 3.05 MW、最小需求功率为 0.4 MW。分时电价时段划分及对应价格如表 1 所示。储能系统的各项经济参数以及技术参数详见附录 A 表 A2。

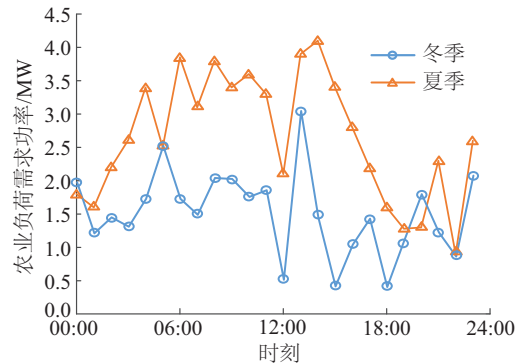


图 4 典型日农业负荷功率曲线

Fig. 4 Typical daily agricultural load power curves

表 1 分时电价

Table 1 Time-of-use tariff

分时	时段	电价/ [元/(kW·h)]
夏季	谷时	23:00—08:00
	平时	11:00—16:00, 21:00—23:00
	峰时	08:00—11:00, 16:00—21:00
冬季	谷时	23:00—08:00
	平时	08:00—15:00
	峰时	15:00—23:00

4.2 模型配置结果分析

4.2.1 可靠性优化结果

分析图 5 可知,农业园区夏、冬两季典型日净负荷功率经平抑后整体趋势不变,消除了功率波动部分,保留主要能量,有效平滑了功率曲线。分析图 6 可知,经平抑后,夏、冬两季净负荷功率最大波动率得到显著改善,分别从 23%、22% 降至 10%;同时,两季超出波动率阈值的时长占比也大幅下降,分别从 46.4%、62.1% 降为 5.0% 和 4.8%,均已满足运行可靠性的量化要求。

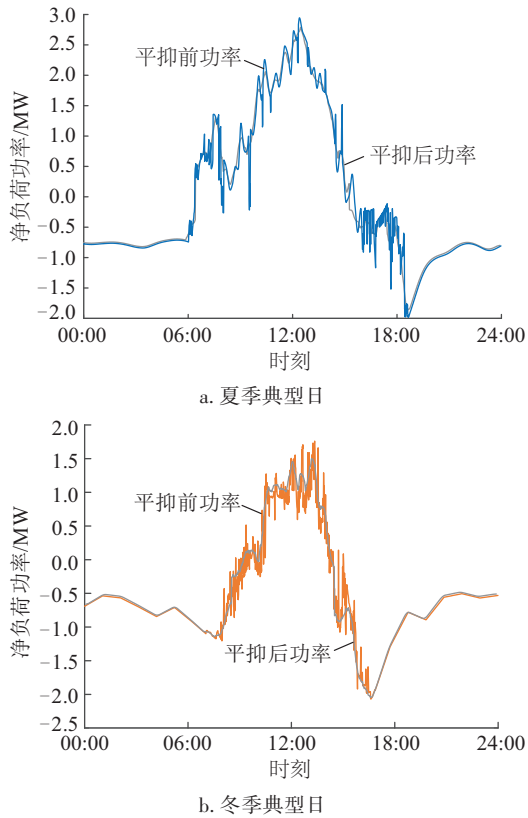


图5 净负荷功率平抑结果

Fig. 5 Net load power flattening results

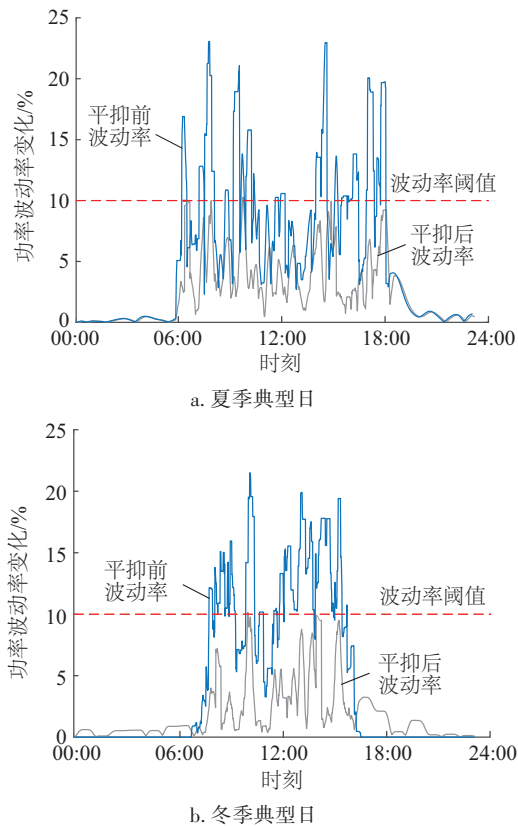


图6 净负荷功率波动率分析

Fig. 6 Analysis of net load power fluctuation

4.2.2 经济性优化结果

经济性优化采用 PSO 算法进行迭代, 园区夏、冬两季的 N_{pv} 净现值全局优化进程如图 7 所示。

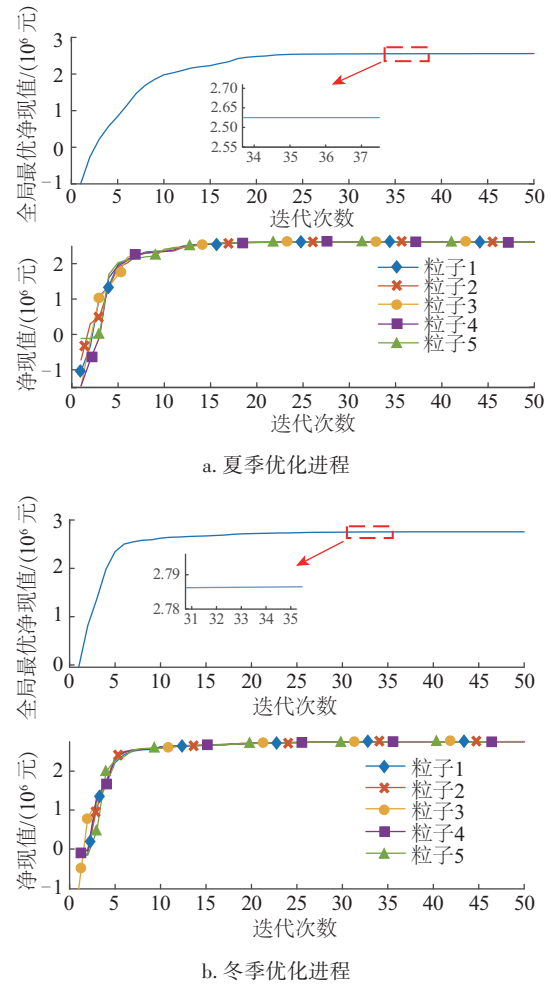


图7 夏、冬两季PSO优化进程

Fig. 7 PSO optimization process in summer and winter

夏、冬两季典型日储能配置模拟运行结果如图 8 所示, 结合分时电价策略分析:

1) 在 22:00—01:00, 农业负荷用电较小且为低谷阶段, 通过电网补充储能可实现峰谷电价套现。

2) 在 12:00, 净负荷功率大于农业负荷需求, 依据此时电价以及储能荷电状态判断是否需补充或并网, 实现剩余能量消纳。

3) 在 08:00—10:00, 农业负荷用电需求增大, 且处于峰时电价阶段, 储能放电削弱负荷对电网需求, 节省用电成本并缓解峰谷压力。

储能配置结果如表 2 所示, 夏季典型日储能配置容量为 2.57 MW·h、净现值总收益为 262.3 万元、负荷波动下降约 32%; 冬季典型日储能配置容量为 2.73 MW·h、净现值总收益为 278.7 万元、负荷波动下降约 27%。

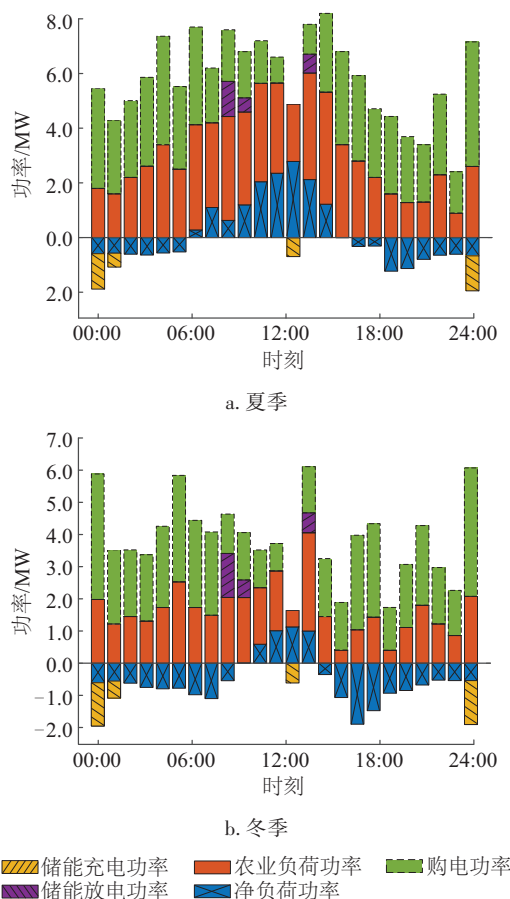


图8 典型日模拟运行结果

Fig. 8 Simulated operation results on typical days

表2 储能容量配置结果

Table 2 Energy storage capacity configuration results

季节	配置容量		净现值/ 万元	负荷 波动/%
	光伏	储能		
夏季	8.0	2.57	262.3	32
冬季		2.73	278.7	27

注:光伏配置容量单位为 MW;储能配置容量单位为 MW·h。

综上,农业园区在冬季典型日所需储能容量及净现值总收益均大于夏季。因此,为了农业园区微电网系统能满足不同季节下的负荷功率需求以及更大的经济效益,以冬季典型日为农业园区储能配置最优容量。

4.2.3 削峰填谷

夏、冬两季配储削峰填谷如图9所示。夏季典型日削峰填谷:配储前负荷功率样本方差和标准差分别为 6.02、2.45,最大峰谷差为 6.15 MW;配置储能后,样本方差和标准差分别为 2.27、1.65,负荷最大峰谷差约为 5.35 MW,峰谷差率下降约 13.1%。冬季典型日削峰填谷:配储前,负荷功率样本方差和标准差分别为 2.47、1.57,负荷最大峰谷差约为 4.5 MW;配

置储能后,样本方差和标准差分别为 1.3、1.14,负荷最大峰谷差约为 3.85 MW,峰谷差率下降约 14.4%。

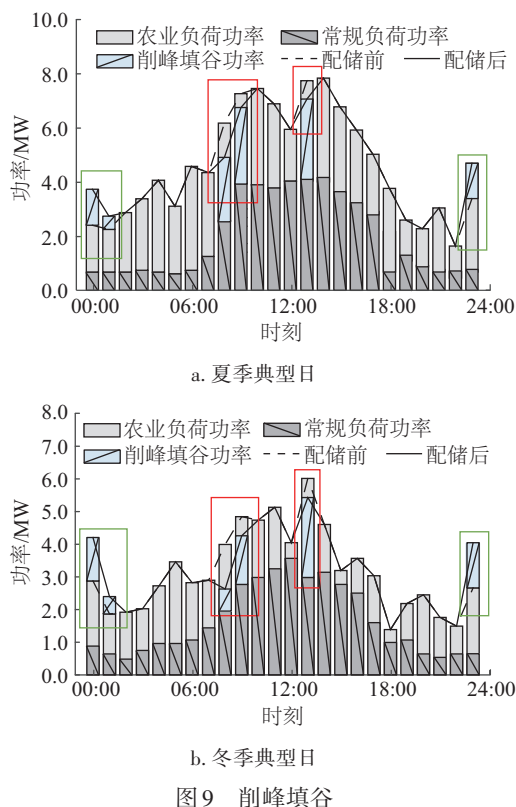


图9 削峰填谷

Fig. 9 Peak shaving and valley filling

4.3 优化配置方法对比分析

为验证本文所提方法的有效性及其优越性,在初始条件不变的基础上,以冬季典型日为例构建不同配置场景,根据可靠性以及经济性结果进行优化配置方法对比分析。

场景 1:两阶段优化(本文所提负荷划分方法)。

场景 2:混合所有负荷,不考虑负荷划分直接配置。

4.3.1 可靠性优化结果对比分析

不同场景下配置方法平抑功率波动效果如表3所示。冬季光伏功率波动率超出阈值占比为 72.5%、最大值为 21%,通过直接配置方法进行平抑后,其波动率超出阈值占比下降为 9.3%,最大值下降为 11.2%;但相较于本文所提负荷划分配置方法下的 4.8% 和 10%,功率平抑效果较差,且未能满足运行可靠性的量化评估指标。

4.3.2 经济性优化结果对比分析

经济性优化结果如表4所示。直接配置方法求得的最优储能容量为 2.25 MW·h,储能运行周期内 N_{pv} 总收益为 229.5 万元;基于本文负荷划分方法求得的最优储能容量为 2.73 MW·h,储能运行周期内 N_{pv} 总收益为 278.7 万元;不同配置方法在经济上相差约 49.2 万元,储能容量配置总收益可提高 21%。

表3 不同配置方法平抑效果

Table 3 Different configuration flattening effect

配置方法	平抑对比效果		
	平抑对象	波动率超出 阈值占比/%	功率波动率最 大值%
直接优化配置	光伏功率	72.5	21
	配储后	9.3	11.2
负荷划分配置	光伏功率	72.5	21
	配储后	4.8	10

表4 经济性优化结果

Table 4 Economical optimization results

配置方法	配置容量/(MW·h)	净现值/万元
直接配置	2.25	229.5
负荷划分配置	2.73	278.7

综上,本文所提基于负荷划分的储能容量配置模型可进一步实现对光伏-储能的最优利用,确保了农业园区微电网系统在运行可靠性以及经济性上的最优需求。

5 结 论

通过对农业园区微电网储能容量优化配置的研究可知,在面对发电侧、用电侧多需求应用时,采用负荷划分可有效确保储能配置在技术和经济上的可行性。所得主要结论如下:

1)针对发电侧光伏功率不确定性导致的系统稳定性差问题,通过 RMS 包络技术可有效实现波动平抑;在算例中,夏、冬两季典型日负荷系统整体功率波动分别下降 32% 和 27%,负荷最大峰谷差率分别下降 13.1%、14.4%,实现了削峰填谷。

2)针对用电侧负荷多样化需求导致的能源利用率低、综合经济效益差等问题,基于 PSO 优化算法以及需求响应引导下的分时电价策略能很好的权衡配置容量与经济收益的平衡;在不同配置方法对比分析中,本文所用方法可使得净现值经济性提高 21%,确保了农业园区在储能项目投资收益上的最大化需求。

在本文研究基础上,为进一步提高优化模型的精度,未来还可有以下研究方向:1)负荷方面可深入的探讨更多类型的农业功率需求;2)储能经济优化阶段,可考虑加入储能寿命损耗带来的影响。

[参考文献]

[1] 徐高远,王晓晶. 计及动态碳排放对新能源消纳市场的价格研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 360-367.
XU G Y, WANG X J. Price study on new energy consumption market considering dynamic carbon emissions

[J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(2): 360-367.
[2] 王佳惠,牛玉广,陈玥,等. 计及火电深度调峰的高比例可再生能源电力系统日前优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 493-499.
WANG J H, NIU Y G, CHEN Y, et al. Research on day-ahead optimal dispatching of high-proportion renewable energy power system considering deep peak load regulation of thermal power[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(1): 493-499.
[3] 胡泽春,蔡福霖,冯建洲. 兼顾新能源消纳与频率电压支撑的电池储能系统优化规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 3-12.
HU Z C, CAI F L, FENG J Z. Optimal planning of battery energy storage system considering renewable energy consumption and frequency and voltage support [J]. Electric power automation equipment, 2024, 44(7): 3-12.
[4] 赵超,王斌,孙志新,等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 256-262.
ZHAO C, WANG B, SUN Z X, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(1): 256-262.
[5] HAJIAGHASI S, SALEMNIA A, HAMZEH M. Hybrid energy storage system for microgrids applications: a review [J]. Journal of energy storage, 2019, 21: 543-570.
[6] 周竞,耿建,唐律,等. 可调节负荷资源参与电力辅助服务市场规则分析与思考[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 120-127.
ZHOU J, GENG J, TANG L, et al. Rule analysis and cogitation for adjustable load resources participating in ancillary service market [J]. Electric power automation equipment, 2022, 42(7): 120-127.
[7] WU K L, GU J, MENG L, et al. An explainable framework for load forecasting of a regional integrated energy system based on coupled features and multi-task learning [J]. Protection and control of modern power systems, 2022, 7(1): 24.
[8] 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 W Q, GAO H J, WANG R J, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering distributed generator support and agricultural facility coordination [J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(21): 89-98.
[9] 王婷,李凤婷,周远翔,等. 基于新能源-负荷相似性的源荷储协调调峰优化调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 15-21.
WANG T, LI F T, ZHOU Y X, et al. Source-load-energy

- storage coordinated optimal scheduling for peak regulation based on new energy resource-load similarity [J]. *Electric power automation equipment*, 2024, 44(3): 15-21.
- [10] 包文俊, 葛敏, 袁毅, 等. 计及需求响应的风光储独立微电网技术经济优化[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(5): 343-350.
- BAO W J, GE M, YUAN Y, et al. Techno-economic optimization of wind/photovoltaic/storage independent microgrid considering demand response [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(5): 343-350.
- [11] 陈正, 杨建华, 靳开元, 等. 基于能源区块链的设施农业负荷时移与光伏就地消纳控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(2): 47-55.
- CHEN Z, YANG J H, JIN K Y, et al. Control strategy of time-shift facility agriculture load and photovoltaic local consumption based on energy blockchain [J]. *Electric power automation equipment*, 2021, 41(2): 47-55.
- [12] 张晓虎, 倪景源. 考虑柔性负荷的联合发电系统低碳经济优化调度[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(6): 420-429.
- ZHANG X H, NI J Y. Low-carbon economic optimal dispatch of combined power generation system considering flexible loads [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2025, 46(6): 420-429.
- [13] FAN Z T, WAN Z R, GAO L S, et al. A multi-objective optimal configuration method for microgrids considering zero-carbon operation [J]. *IEEE access*, 2023, 11: 87366-87379.
- [14] 刘道兵, 李珏岑, 齐越, 等. 考虑碳效益和运行策略的风电场储能优化配置[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(2): 664-675.
- LIU D B, LI J C, QI Y, et al. Wind farm energy storage optimization configuration considering carbon benefit and operation strategy [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2025, 46(2): 664-675.
- [15] 郝丽丽, 吕肖旭, 丁逸行, 等. 考虑容量共享的新能源-电网-用户侧储能优化配置策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5607-5619.
- HAO L L, LYU X X, DING Y X, et al. Optimal configuration strategy of renewable energy-grid-customer side energy storage considering capacity sharing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(14): 5607-5619.
- [16] 金凡凡, 郭瑞鹏, 林振智, 等. 考虑配电网供电可靠性与经济性的FTU优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(12): 132-139.
- JIN F F, GUO R P, LIN Z Z, et al. Optimal placement of FTUs considering power supply reliability and economy of distribution network [J]. *Electric power automation equipment*, 2024, 44(12): 132-139.
- [17] 刘慧文, 王生铁, 刘广忱, 等. 风光柴储微电网容量优化配置的运行策略[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9): 453-460.
- LIU H W, WANG S T, LIU G C, et al. Operation strategy of optimal capacity configuration for microgrid with WT-PV-DE-BES [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(9): 453-460.
- [18] 董昱, 孙大雁, 许丹, 等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(6): 2039-2056.
- DONG Y, SUN D Y, XU D, et al. Challenges, response and prospects for power balance in new power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(6): 2039-2056.
- [19] 纪历, 杨晓伟, 陈振宇, 等. 考虑农业电排灌负荷的配电网运行优化策略研究[J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(4): 66-70, 76.
- JI L, YANG X W, CHEN Z Y, et al. Research on power distribution network operation optimization strategy considering agricultural electric drainage and irrigation load [J]. *Power demand side management*, 2020, 22(4): 66-70, 76.
- [20] 王君勤, 叶生进, 樊毅. 中国不同气候区参考作物蒸散量计算模型适用性评价[J]. *节水灌溉*, 2022(3): 82-91.
- WANG J Q, YE S J, FAN Y. Applicability evaluation of reference crop evapotranspiration calculation models in different climatic regions of China [J]. *Water saving irrigation*, 2022(3): 82-91.
- [21] 陈艳波, 田昊欣, 刘宇翔, 等. 计及电动汽车需求响应的高速公路服务区光储充鲁棒优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(5): 1752-1766, I0011.
- CHEN Y B, TIAN H X, LIU Y X, et al. Robust optimization configuration of photovoltaic-storage-charging integrated system in expressway service area considering demand response of electric vehicles [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(5): 1752-1766, I0011.
- [22] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(S1): 88-97.
- SUN Y S, TANG X S, SUN X Z, et al. Research on energy storage capacity allocation method for smoothing wind power fluctuations [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(S1): 88-97.
- [23] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16): 1-8.
- WANG C S, YU B, XIAO J, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 1-8.
- [24] YAO M Q, CAI X. Energy storage sizing optimization for large-scale PV power plant [J]. *IEEE access*, 2021, 9: 75599-75607.
- [25] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生

能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the

utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.

RESEARCH ON OPTIMAL ALLOCATION OF ENERGY STORAGE IN AGRICULTURAL PARKS BASED ON LOAD SEGMENTATION

Cheng Long¹, Qiu Shuang¹, Zhang Ziqian¹, Han Bing², Liu Lu¹, Song Yan³

(1. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China;

3. State Grid Huangshan Electric Power Supply Company, Huangshan 245000, China)

Abstract: The new power system in agricultural parks faced the problems of poor system operation stability and low comprehensive economic efficiency due to power fluctuation on the generation side and diverse and uncertain load demand on the consumption side. For this reason, this paper constructed a model of optimized allocation of energy storage capacity based on load division, aiming to improve the stability and economic efficiency of the system. Firstly, a two-stage energy storage allocation tactic was determined in accordance with load segmentation. In this regard, the conventional load demand was preferentially supplemented by photovoltaic power, and the root-mean-square (RMS) envelope technique was harnessed to quell the unsteady power oscillations. Secondly, for the agricultural load demand, the net present value (NPV) was constructed as the optimization objective function. This was then conjoined with the time-of-use tariff strategy to impel the energy storage capacity to perform peak shaving, valley filling, and consumption compensation. Finally, by leveraging the summer and winter data of an agricultural park and deploying the particle swarm optimization algorithm, the outcomes of the two-stage allocation were attained. Namely, the overall power oscillations of the summer and winter loads are abated by around 32% and 27% respectively. The peak-to-valley ratios of the loads are lessened by 13.1% and 14.4% respectively. Moreover, the comprehensive economic return of energy storage is enhanced by 21% when compared with the direct allocation method. The exemplifications corroborated that the methodology proposed in this paper could efficaciously attenuate the microgrid power fluctuation quandary and augment the comprehensive economic benefits engendered by energy storage allocation.

Keywords: PV power; power flow optimization; energy storage; agricultural park; load division; time-of-use tariff

附录 A

表 A1 农业负荷参数

Table A1 Agricultural load parameters

农业负荷	参数	数值
浇灌型农业 负荷参数	作物种植面积/hm ²	150~200
	作物系数	0.4~1.2
	有效降水量/mm	0.5~5
	系统效率	0.8~0.9
	日外界辐射量/[(MJ/m ²)/d]	20~30
	工作区间	08:00—17:00
生产型农业 负荷参数	农机数量	10~30
	充电上限功率/kW	250
	充电效率	0.85~0.9
	低/高强度放电功率/kW	100/150
	充电周期/h	24

表 A2 经济技术参数

Table A2 Economic and technical parameters

参数	数值
年贴现率/%	5
投资年限/a	10
成本系数/[元/(kW·h)]	930
维护系数/[元/(kW·h)]	0.02
充放电效率	0.9
荷电状态阈值范围	0.2~0.9
财政补贴/[元/(kW·h)]	0.3