

引用格式:刘鹏飞,林顺富,解大.阶梯-峰谷电价机制下户用光-储系统双层滚动优化运行策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):22-32.

Citation: LIU Pengfei, LIN Shunfu, XIE Da. Two-layer rolling optimization operation strategy of household photovoltaic-energy storage system under step-peak-valley tariff mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 22-32.

阶梯-峰谷电价机制下户用光-储系统 双层滚动优化运行策略

刘鹏飞¹, 林顺富¹, 解大²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 分布式光伏对于实现“双碳”目标和建设以新能源为主体的新型电力系统具有重要意义。研究了当前阶梯-峰谷电价体系下户用光-储系统的优化运行问题。首先, 介绍了户用光-储系统的结构和电价体系。其次, 考虑阶梯-峰谷电价对用户长时间尺度用能策略的影响, 提出了基于模型预测控制的户用光-储系统双层滚动优化运行策略。其中, 上层模型为基于阶梯电价, 以年综合收益最大为目标的年滚动优化, 下层模型为基于峰谷电价, 以日运行成本最低为目标的日滚动优化。下层模型中光伏和储能的运行方案以上层优化结果为参照, 并修正由于不确定性因素导致的系统状态偏差。此外, 采用 Informer 模型解决了长时间尺度下系统状态的准确预测问题。最后, 通过算例仿真结果表明, 所提策略可以推迟高阶峰电价的使用时刻, 有效提高居民用户的整体收益。

关键词: 户用光-储系统; 阶梯-峰谷电价体系; 模型预测控制; 优化运行

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.003 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2024)06-0022-11

Two-layer rolling optimization operation strategy of household photovoltaic-energy storage system under step-peak valley tariff mechanism

LIU Pengfei¹, LIN Shunfu¹, XIE Da²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Ministry of Education), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Distributed photovoltaic (PV) is of great significance to realizing the objectives of “carbon peaking and carbon neutrality” and establishing a new power system mainly supported by new energy sources. In this study, the optimization operation of the household PV-energy storage system under the present step-peak valley tariff mechanism was investigated. Firstly, the structure of household PV-energy storage system and tariff mechanism were introduced. Secondly, by considering the impact of step-peak valley tariff on users' energy use strategy on long time scale, a two-layer rolling optimization operation strategy of household PV-energy storage system based on model predictive control (MPC) was proposed, where the upper-layer model focused on step tariff-based annual rolling optimization with maximum annual comprehensive revenue as objective; in the lower-layer model, the operation scheme of PV and energy storage was based on the optimization results of the upper layer, and the deviation of system state caused by uncertain factors was corrected. In addition, the Informer model was used to achieve accurate prediction of the system state on a long time scale. Finally, the simulation results show that the proposed strategy can delay the arrival of high step tariffs and effectively improve the overall revenue of residential users.

Key words: household photovoltaic-energy storage system; step-peak valley tariff mechanism; model predictive control; optimization operation

整县光伏政策的出台为中国分布式光伏的快速发展提供了契机, 光伏出力的波动性和负荷峰谷

问题使得配备储能的光伏系统成为了技术关注热点^[1-5]。用户可通过安装光-储系统并调整用电策略

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 上海市科委科技创新计划项目(18DZ1203700); 国家自然科学基金(52077137)

通信作者: 解大(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统等研究; E-mail: xieda@sjtu.edu.cn

以提高收益。户用光伏发电系统通常有并网和离网 2 种模式,其中并网光伏系统分为自发自用、余电上网和全额上网 2 种形式^[6-7]。目前,对于户用光伏和储能有较多鼓励政策,在平价上网的趋势下仍有部分市、区对户用光伏进行补贴,各地区针对储能也有相应的补贴政策^[8]。

现阶段针对户用光-储系统的研究主要集中于以下 2 个方面:1)研究不同时间尺度下含光伏和储能的微电网系统的优化调度和运行方案^[9-13];2)利用模型预测控制(model predictive control, MPC)处理可再生能源的波动性,对新能源-储能系统的能量流动进行优化管理^[14-18]。针对光-储系统的优化调度运行策略,文献[9]基于经济性和舒适度建立了家庭负荷优化调度的多目标优化模型,在保证舒适度的前提下降低了家庭用电费用。文献[10]提出了一种基于凸优化和强化学习的最优储能控制算法,将光伏发电和储能系统集成到家庭微电网中,并结合强化学习技术自适应地确定储能系统的剩余能量,有效减少了用户的化石燃料消耗。文献[11]提出了考虑光伏出力不确定性的家庭光-储系统鲁棒优化调度模型,并通过改进萤火虫算法进行求解,降低了系统在运行中的经济风险。文献[12]提出了一种基于家庭能量管理系统与电网能量管理系统之间的信息交互和日前光伏预测的电动汽车充放电方案,并通过实时监测数据控制充放电电量以降低用户电费和弃光率。文献[13]提出了供给侧和需求侧之间的住宅用户能源管理框架,采用多场景预测和随机优化规划,实现了最小化日运营成本和降低电压违规风险的目标。上述研究在优化过程中多以 1 d 为周期,在计算年度收益时仅将典型日运行收益简单累加,没有将前一日运行结果作为后一日的初始值进行长期优化,且忽略了阶梯电价的变化,与实际情况不符,无法指导用户进行长时间尺度的能量管理。

针对基于 MPC 的光-储系统能量优化管理策略,文献[14]建立了温度、电价、光伏和刚性负荷的预测模型,并在 MPC 能量管理系统的框架下不断更新系统状态和执行控制策略,从而实现家庭能量的最优化管理。文献[15]提出了基于马尔可夫链蒙特卡罗方法对电动汽车的随机性进行建模,并在此基础上建立了基于 MPC 技术的全局在线优化算法,降低了系统运行成本。文献[16]提出了智能家

居电器调度方案,使用自触发的 MPC 限制净功率需求并优化电器的启动时间,以满足家庭电力需求。文献[17]提出了家庭光-储系统多时间尺度的能源管理框架,采用 MPC 方法应对光伏预测误差,并反映电池的最新状态,实现了家庭用能策略的优化。文献[18]提出了基于改进 MPC 的双层多时间尺度微电网优化策略,自适应处理微电网中的不确定性和复杂约束,提高了系统鲁棒性和优化精确性。上述研究虽然能够通过日前-MPC 日内滚动优化的方式处理可再生能源波动性对系统实时优化调度方案的影响,但时间尺度过短,所采用的预测模型无法精准预测长时间尺度下的系统状态,不适用于阶梯-峰谷电价机制下以年为周期的 MPC 长期滚动优化。

因此,本文针对阶梯-峰谷电价机制下户用光-储系统优化运行问题的特殊性,提出了基于 MPC 和 Informer 模型的双层滚动优化运行策略。本文的主要贡献如下:1)给出户用光-储系统的详细结构,理清当前电力市场的阶梯-峰谷电价机制;2)建立基于 MPC 的户用光-储系统优化运行的双层滚动模型,上层针对阶梯电价机制进行长时间尺度的年滚动优化,下层针对峰谷电价机制进行短时间尺度的日滚动优化;3)将 Informer 模型加入 MPC 的预测环节,解决长时间尺度的户用光-储系统状态预测问题。

1 户用光储系统和电价体系

1.1 户用光-储系统

户用光-储系统由光伏组件、储能系统、变流器、数据云平台、中央控制器及双向电表组成。图 1 为户用光-储系统。户用光-储系统在运行过程中分为能量流动和信息流动。

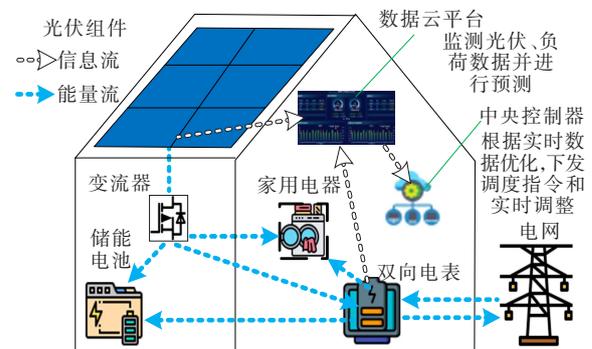


图 1 户用光-储系统

Figure 1 Household PV-energy storage system

1) 能量流:光伏发电量通过并网逆变器供给交流侧,剩余的电量上网售电或者给储能充电,直流侧用电由储能供给。

2) 信息流:数据云平台监测负荷和光伏发电数据,并进行预测,中央控制器以数据云平台的预测数据以及阶梯-峰谷电价为基础进行优化调度并下发指令,同时在运行过程中根据预测误差进行实时调整。

1.2 居民电价体系

中国有2种电价体系,峰谷电价和阶梯电价,以上海市为例,上海市居民电价结构如表1所示。由表1可知,上海居民阶梯电价I档为0~3 120 kW·h,II档为3 120~4 800 kW·h,III档为4 800 kW·h以上;在每一档阶梯电价中,又分为该阶梯级的峰、谷电价。图2为居民日负荷曲线,根据图2可知居民用电的高峰分别在06:00—08:00、11:00—12:00和19:00—21:00,而电价高峰时段为06:00—22:00,与居民用电的高峰时段高度重合。因此可利用阶梯-峰谷电价特性,优化户用光-储系统的用电计划和储能充放电策略来获取收益。

表1 上海市居民电价结构

Table 1 Residential step tariff structure in Shanghai

电价档位	当年用电量/(kW·h)	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
I档	0~3 120	峰/0.617,谷/0.307
II档	3 120~4 800	峰/0.677,谷/0.337
III档	4 800以上	峰/0.987,谷/0.667

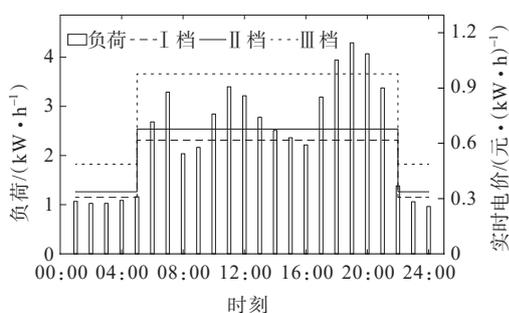


图2 居民日负荷曲线

Figure 2 Residential daily load curve

1.3 光伏上网电价

可根据年等效利用小时数将光伏资源区分为3类,等效利用小时数大于1 600 h为I类资源区,1 400~1 600 h为II类资源区,1 200~1 400 h为III类资源区。表2为中国部分地区的上网电价。上网电价分为光伏指导价和燃煤基准价,选择发自用、余电上网模式的用户上网电价为燃煤基准

价,选择全额上网模式的用户上网电价为光伏指导价。

表2 中国部分地区的上网电价

Table 2 Feed-in tariffs in some parts in China

地区	光伏资源分区	光伏指导价/(元·(kW·h) ⁻¹)	燃煤基准价/(元·(kW·h) ⁻¹)
北京	II	0.358 2	0.358 9
上海	III	0.414 6	0.415 5
宁夏	I	0.258 4	0.259 5
广东	III	0.452 9	0.453 0

2 户用光-储系统双层滚动优化运行策略

2.1 模型预测控制算法

模型预测控制是一种基于预测模型的闭环最优控制算法,通过预测未来一段时域内的系统状态和输出,重复滚动优化来获取最优控制量,并用于实际控制^[19]。在电力系统中,MPC通常采用状态空间方程表示,典型的状态空间模型如下:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x(k+1)$ 为系统 $k+1$ 时刻的状态量; $x(k)$ 为系统 k 时刻的状态量; A 为系统的状态矩阵; B 为系统的控制矩阵; $u(k)$ 为系统 k 时刻的控制变量; $y(k)$ 为系统 k 时刻的输出量; C 为系统的输出矩阵。

模型预测控制算法一般都包括预测模型、滚动优化、反馈校正3个环节。

1) 预测模型。

预测模型的作用是根据系统当前状态预测系统未来的行为,预测模型只重视模型的功能,而不注重模型的形式^[20]。

2) 滚动优化。

滚动优化是模型预测控制的关键,滚动优化是在每个滚动优化起始时刻寻求未来有限时域内最优控制策略,并且只执行第一阶段的控制策略,下一个时刻的控制量则根据系统更新的状态信息进行重新优化求解,如此重复滚动优化,直至完成整个周期的调度计划^[21]。滚动优化的目标通常是求解一个最小化问题,常见的优化问题模型如下:

$$\min J(y, u) = \sum_{k=1}^N \|y(t+k|k) - y_d(t+k|k)\|^2 \quad (2)$$

式中, (y, u) 为系统的优化目标; $y(t+k|k)$ 为系统在 k

时刻的预测输出变量; $y_a(t+k|k)$ 为系统在 k 时刻的参考输出变量。

3) 反馈校正。

在实际过程中,模型预测输出和实际输出不可能完全一致,因此在滚动优化过程中会根据实际测量的输出值对预测输出值进行校正,然后进行新一轮的优化从而构成闭环优化^[22]。

2.2 Informer 模型

文献[23-24]提出了Informer模型,该模型通过引入多头自注意力机制、自适应长度预测器和预测与反馈结合等模块,有效捕捉时间序列中的长期依赖性和规律,从而提高了长期预测的准确性和稳定性。本文将Informer模型应用到MPC的预测模型中,并对年滚动优化中的年负荷和年光照强度进行长期预测,解决了长时间尺度的户用光-储系统状态预测问题。图3展示基于Informer模型的MPC实现过程。

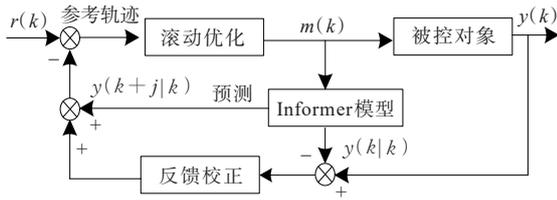


图3 基于Informer模型的MPC实现过程

Figure 3 MPC implementation process based on Informer model

图3中, $r(k)$ 为系统参考输出; $m(k)$ 为输入; $y(k)$ 为实际输出; $y(k|k)$ 为模型输出; $y(k+j|k)$ 为预

测输出。

2.3 户用光-储系统MPC双层滚动优化模型

2.3.1 双层滚动优化框架

由于用户实际光伏、负荷和预测值存在误差,阶梯电价随着居民用电量变化。为在实际应用中进行优化控制,本文提出基于MPC的双层滚动优化模型以消除预测的不确定性和阶梯电价的变化。图4展示了MPC双滚动优化框架。

1) 基于阶梯电价的年滚动优化层。

上层年滚动优化在每年年初即开始计算,通过历史信息对已建成的光伏和负荷的数据进行长期预测,并根据以上数据构建变时间尺度的年滚动优化模型,优化目标为年收益最大。滚动优化间隔为1h,全年共8760h,每滚动一次,预测域缩短1h。年滚动优化结果作为日滚动优化的运行约束和参考,日滚动优化运行后,用户剩余的梯级电量、收益和储能状态被赋为下一次年滚动优化的初始值。

2) 基于峰谷电价的日内滚动优化层。

下层日滚动优化以未来4h的负荷和光伏的超短期预测为基础,以年滚动优化的预测值和优化结果作为参考,采用罚函数法构建用户日运行成本最低的日滚动优化模型。日滚动优化间隔为15min,滚动优化总时长为24h,次数为96次,每滚动4次即1h后存储能状态值、阶梯电量,带回作为下一次年滚动优化初始值,并将此时的光伏和负荷实际出力值作为历史数据反馈给年滚动优化预测模型。

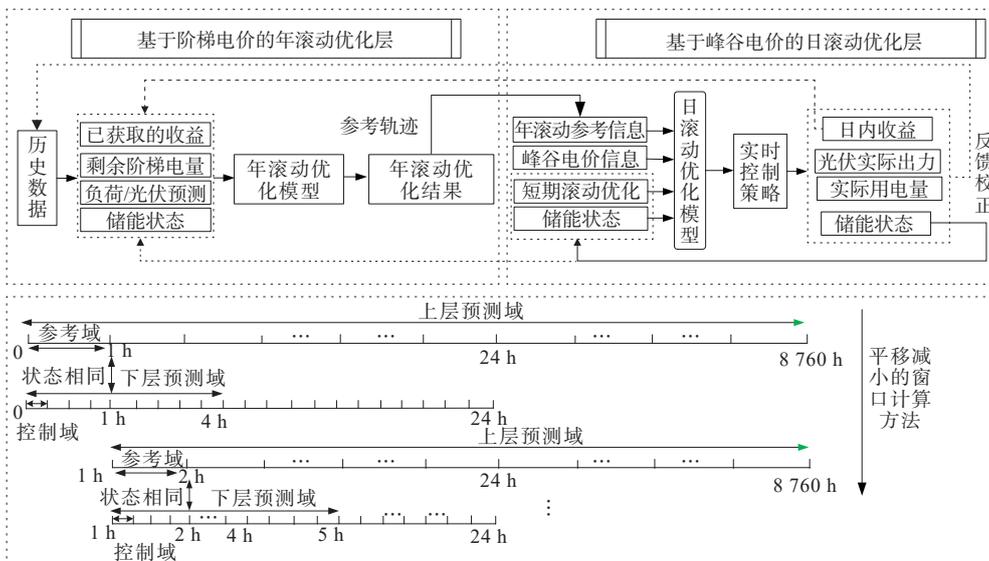


图4 户用光-储系统MPC双层滚动优化框架

Figure 4 Framework of MPC-based two-layer rolling optimization framework for household PV-energy storage system

2.3.2 双层滚动优化模型

1) 年滚动优化的目标函数。

年滚动优化周期很长,储能多次充放电会使容量衰减,影响后期的系统收益,因此需要考虑储能容量衰减成本、售电收益等因素,以优化周期内用户收益最大为目标函数。

电池的容量衰减主要和充放电循环次数、放电深度、时间和环境温度有关,本文采用的非线性的电池容量衰减模型^[25]如下:

$$\begin{cases} E_{\text{loss}} = [1 - (1 - E'_{\text{loss}}) e^{-mf}] E_{\text{bat}} \\ E_{\text{real}} = E_{\text{bat}} - E_{\text{loss}} \\ f_d = (f_\sigma + f_t) f_{\text{soc}} f_T \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_{loss} 、 E'_{loss} 分别为电池充放电循环 m 次前后的衰减容量; m 为充放电循环次数; E_{bat} 为储能电池的容量; E_{real} 为储能电池 m 次循环衰减后的真实容量; f_d 为一次循环充放电容量衰减函数; f_σ 、 f_t 、 f_{soc} 、 f_T 分别为放电深度、放电时间、荷电状态(state of charge, SOC)和温度对储能电池寿命的影响函数。

年滚动优化的目标函数是年收益最大:

$$\max C = C_1(8760 - T_0) + C_a(T_0) \quad (4)$$

$$C_a(T_0) = C_1 - C_2 + C_3 \quad (5)$$

式(4)、(5)中, C 为年收益; C_a 为已运行时间段产生的收益函数; C_1 为从 T_0 时刻起年滚动优化收益函数; C_1 为用户节省的电费; C_2 为储能固定运行维护成本和寿命衰减成本; C_3 为光伏上网的收益。

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{t=T_0}^{8760} (P_{\text{load}}(t) - P_{\text{buy}}(t)) C_{\text{buy}}(t) \\ C_2 = \frac{C_{\text{bat}}^{\text{year}} E_{\text{bat}}}{8760} (8760 - T_0) + \sum_{t=T_0}^{8760} mc_{\text{loss}} E_{\text{loss}} \\ C_3 = \sum_{t=T_0}^{8760} P_{\text{sell}}(t) C_{\text{sell}}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, T_0 为年滚动优化初始时刻; $P_{\text{load}}(t)$ 为系统的负荷; $P_{\text{buy}}(t)$ 为用户购电功率; $C_{\text{buy}}(t)$ 为购电电价; $C_{\text{bat}}^{\text{year}}$ 为储能电池年运行维护成本; c_{loss} 为储能电池单位容量衰减成本; $P_{\text{sell}}(t)$ 为用户售电功率; $C_{\text{sell}}(t)$ 为售电电价。

2) 日滚动优化的目标函数。

日内滚动优化的目标是日内运行成本最低,对于用户的年最优收益属于局部最优解,为了使得用户的年收益更优,在日滚动优化的目标函数中增加因光伏出力误差造成的惩罚项,日滚动优化目标函数如下:

$$\min F = (F_1 + F_2 + f_{\text{pun}}) \quad (7)$$

式中, F 为用户在一个完整日的运行成本; F_1 为用户的购电成本; F_2 为储能电池的充放电成本; f_{pun} 为因光伏预测与实际出力误差造成光-储系统功率不平衡而需要通过储能来平抑波动的惩罚项。

$$F_1 = \sum_{(t_0, t_0 + n\Delta t)} (P_{\text{buy}}(t) C_{\text{buy}}(t) - P_{\text{sell}}(t) C_{\text{sell}}(t)) \quad (8)$$

$$F_2 = \sum_{(t_0, t_0 + n\Delta t)} \Delta t \times \rho |P_b(t)| (1 + \theta)^{\frac{m}{N_d}} \quad (9)$$

$$f_{\text{pun}} = \begin{cases} \lambda \left(\frac{S_y(t) - S(t)}{0.5} \right)^2, & P_{\text{pv},y}(t) \leq P_{\text{pv},d}(t) \\ 0, & P_{\text{pv},y}(t) > P_{\text{pv},d}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式(8)~(10)中, t_0 为日滚动优化初始时刻; n 为日滚动优化周期数; Δt 为滚动优化步长; ρ 为电能损耗系数; N_d 为储能循环寿命; $P_b(t)$ 为储能充放电功率; θ 为电池老化系数; $P_{\text{pv},y}(t)$ 为每年滚动优化的光伏预测值; $P_{\text{pv},d}(t)$ 为光伏日内滚动优化的超短期预测值; $S_y(t)$ 为储能年滚动优化的参考值; $S(t)$ 为储能日内滚动优化调度值; λ 为惩罚系数。

2.4 约束条件

1) 光伏和储能电池约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{pv}}(t) \leq P_{\text{pv,max}} \\ S_{\text{min}} \leq S(t) \leq S_{\text{max}} \\ E_{\text{bat}} S(t) \leq E_{\text{real}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $P_{\text{pv}}(t)$ 为光伏在 t 时刻的输出功率; S_{min} 、 S_{max} 分别为储能电池荷电状态最小值和最大值。为了保证储能电池在正常状态下的寿命,本文设定储能电池的荷电状态范围为 20%~90%。

2) 功率平衡约束如下:

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{pv}}(t) + P_b(t) + P_{\text{grid}}(t) \quad (12)$$

式中, $P_{\text{grid}}(t)$ 为用户和电网在 t 时刻交互的功率,购电时为正,售电时为负。

3) 决策变量约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{sell}}(t) \leq P_{\text{s,max}} U_s(t) \\ 0 \leq P_{\text{buy}}(t) \leq P_{\text{b,max}} U_b(t) \\ 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{d,max}} U_d(t) \\ 0 \leq P_{\text{cha}}(t) \leq P_{\text{c,max}} U_c(t) \\ U_s(t) + U_b(t) \leq 1 \\ U_d(t) + U_c(t) \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_{\text{s,max}}$ 、 $P_{\text{b,max}}$ 分别为用户在 t 时刻售、购电最大功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 、 $P_{\text{cha}}(t)$ 分别为储能电池在 t 时刻的放电、充电功率; $P_{\text{d,max}}$ 、 $P_{\text{c,max}}$ 分别为储能电池的最大放电功率、充电功率; $U_s(t)$ 、 $U_b(t)$ 、 $U_d(t)$ 、 $U_c(t)$ 分别为用布尔量表示的用户在 t 时刻的购、售电状态、储能

在 t 时刻的放电、充电状态(0 或 1),以限制系统购、售电不能同时进行,以及电池不能同时充放电。

2.5 实时反馈校正

由于光伏出力实际值与预测值的差异,导致 MPC 超前下发的控制序列与实际情况存在偏差,因此需要实时反馈校正更新系统上、下层运行后储能的状态和实际用电量:

$$\begin{cases} S_{u,in}(T_0) = S_{l,re}(4\Delta t) \\ P_{u,use}(T_0) = P_{l,re}(4\Delta t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $S_{u,in}(T_0)$ 为上层每次年滚动优化储能状态初值; $S_{l,re}(4\Delta t)$ 为下层每 4 次日滚动优化后的实际储能状态值; $P_{u,use}(T_0)$ 为上层每次年滚动优化已用电量的初值; $P_{l,re}(4\Delta t)$ 为下层 4 次日滚动优化后的实际用电量。

2.6 模型求解流程

上述优化模型为混合整数规划问题,在 MATLAB 中利用 Yalmip 工具箱建模并调用 Cplex 求解,求解流程如图 5 所示。

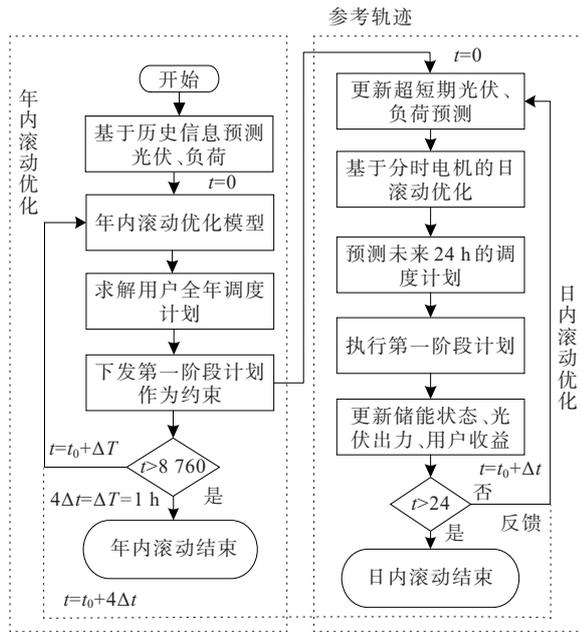


图 5 模型求解流程

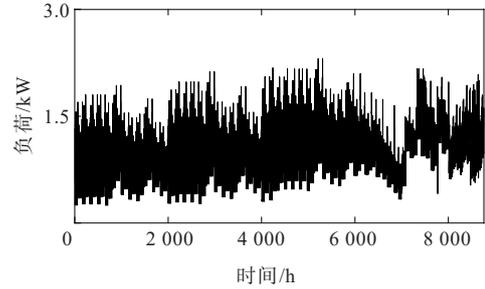
Figure 5 Flow chart of model solving

3 算例分析

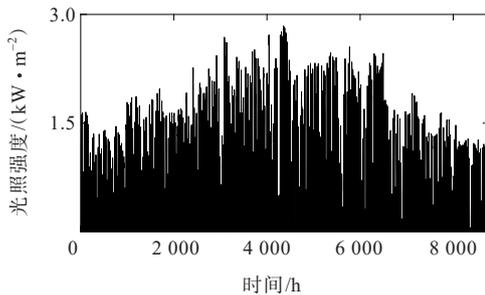
3.1 算例数据

算例选取上海某独立住宅用户,光伏容量为 6 kW,储能电池容量为 10.5 kW·h,仿真使用的居民实时购电电价和上网电价见表 1、2。在一年中选取春、夏、秋、冬的 4 个典型场景进行分析,日期分别为 3 月 18 日、6 月 18 日、9 月 18 日、12 月 18 日,其中

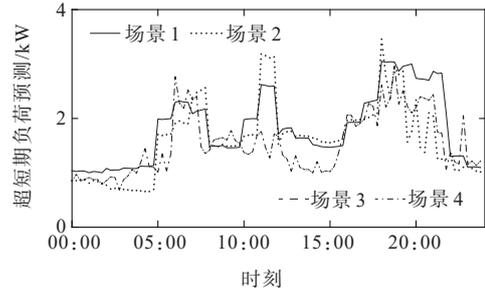
3 月 18 日和 6 月 18 日为周末,9 月 18 日和 12 月 18 日为工作日,滚动优化初始时刻为上述 4 日的零点。图 6 展示了光伏和负荷预测,算例使用的计算机系统为 64 核 2.4 GHz CPU、16 GB GAM, MATLAB 版本为 R2016a。



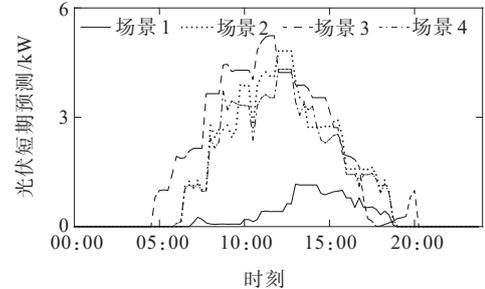
(a) 年负荷预测



(b) 年光照强度预测



(c) 超短期负荷预测



(d) 超短期光伏出力预测

图 6 光伏出力预测和负荷预测

Figure 6 PV output forecasting and load forecasting

3.2 结果分析

3.2.1 年滚动优化结果分析

年滚动优化的预测域较长且会考虑未来天气因

场景4中,此前累计用电量 $4\ 760.81\ \text{kW}\cdot\text{h}$,接近Ⅲ档电价。12月18—20为阴雨天,光伏出力不足,系统在光伏出力大于负荷时将剩余电量全部给蓄电池充电,凌晨不再向电网购电给蓄电池充电,只购买负荷所需即可。

图8给出优化结果为分别预计在 $7\ 590$ 、 $7\ 707$ 、 $8\ 233$ 、 $8\ 470\ \text{h}$ 达到Ⅲ档电价,可见随着时间的推移,长时间尺度的预测中包含越来越多的可用信息,且预测域越来越短使得年预测结果逐年趋近真实值。因此,年滚动优化的计算结果逐步趋优,最大程度上推迟了Ⅲ档电价的到来。

表3给出了从4个时刻起年滚动优化的收益,由表3中数据可知,随着滚动优化的进行,预测越来越准,实际的运行策略得到进一步优化,从而使光-储系统用户逐步达到最优年收益。

表3 系统年滚动优化收益

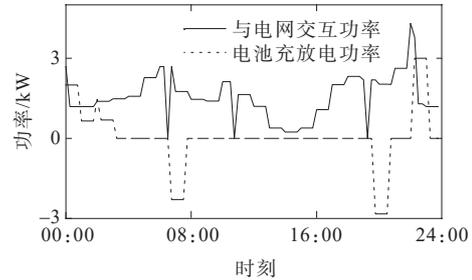
Table 3 Annual rolling optimization revenues of system

年滚动优化起始时刻	年收益/元
时刻1(1 848 h)	3 762.81
时刻2(4 056 h)	4 267.92
时刻3(6 264 h)	4 858.73
时刻4(8 448 h)	5 173.36

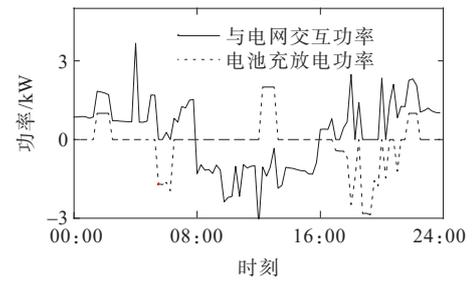
3.2.2 日滚动优化结果分析

光-储系统在4个典型场景下的日滚动优化结果如图9所示,日运行成本分别为 19.324 、 -2.355 、 3.579 、 -1.512 元。

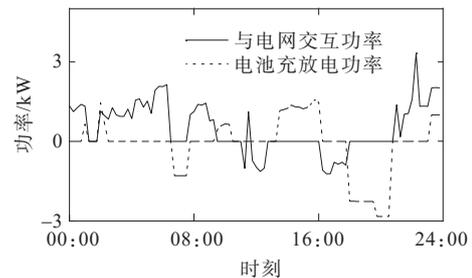
根据图9日内滚动优化结果可知:1)3月18日实际是阴雨天非工作日,光伏年滚动优化预测值和实际值相差较大,光伏出力不足,所以在优化过程中,凌晨加大购电量将储能充满,可保证用户一天的正常运行,剩余不足部分则向电网购电。2)6月18日实际为非工作日的夏季晴天,光伏年滚预测值和实际值接近,光伏出力非常充足,优化过程中主要通过比较滚动预测值和实际值,进一步优化储能的充放电策略和用户的购售电策略。3)9月18日实际为秋季晴天的工作日,光伏出力比较充足,年滚动预测值相比实际值偏小,实时控制时在凌晨的购电量减少,在中午光伏出力充足时,售电量增加。4)12月18日实际为冬季晴天的工作日,光伏出力较为充足,年滚动预测值比实际值小。在中午光伏出力充足时将储能充满,多余的部分则上网售电。



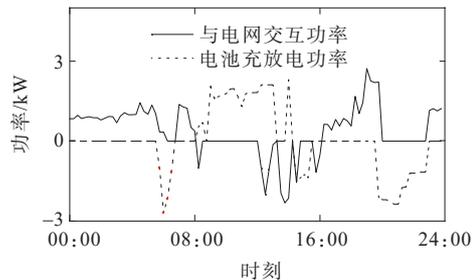
(a) 3月18日



(b) 6月18日



(c) 9月18日



(d) 12月18日

图9 日内滚动优化结果

Figure 9 Daily rolling optimization results

3.2.3 优化效果评估

光-储系统通过年滚动优化和日滚动优化协调运行后,用户与电网的交互功率比较平稳,大部分时间的负荷高峰由 $18:00-21:00$ 转移到 $00:00-06:00$ 。储能充放电较集中,主要在凌晨和光伏出力充足时充电,夜晚光伏出力不足,负荷高峰时放电,降低了储能电池短时频繁充放电造成的寿命衰减。年滚动优化的长期预测规划了用户的长期用电策略,日内滚动优化的实时控制校正了系统的荷电状态、光伏出力、用电量,使得每一次的年滚动优

化都比上一次更精确,从而达到全年最佳运行策略,获得最优年收益。

3.3 与其他方法的对比

为了说明本文策略的优势,将本文提出的双层滚动优化策略和自发自用、余电上网以及传统优化调度方法进行对比。分别选择本文中的3月18日、9月18日和12月18日3个场景计算3种方法下光-储系统的日运行成本,并给出所处的阶梯电价等级。由于自发自用、余电上网和传统优化调度方法没有对年收益进行计算,本文将上述2种方法的日运行收益进行累加得到年收益。表4为3种方法下用户的日运行成本和年收益分析。图10为本文运行策略和其他2种方法延迟阶梯电价的效果。

表4 用户的日运行成本和年收益分析

Table 4 Analysis of users' daily operation costs and annual revenues

场景	余电上网 日运行成本/元	传统优化 调度日运行成本/元	双层滚动运 行策略日运行成本/元	电价档位 (I/II/III)
1	22.5	17.6	19.320	I
2	18.9	11.4	3.579	III/II/II
3	11.7	6.3	-1.512	III/III/II
年收益/元	3 177	5 024	5 579	

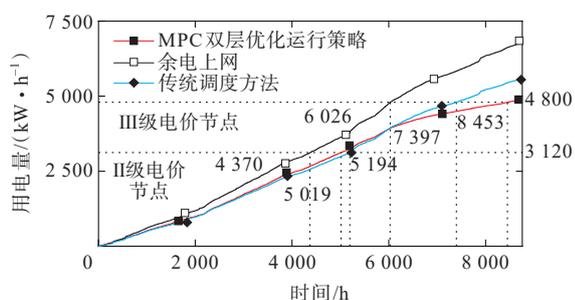


图10 3种方法优化效果对比

Figure 10 Comparison of optimization effects of three methods

根据表4可知,自发自用、余电上网模式下用户没有储能存储多余的光伏发电,因此3个场景下日运行成本均较高,且过早地到达Ⅲ档电价。在场景1时,3种方法均处于Ⅰ档电价,双层滚动运行策略的日运行成本为19.320元,略高于传统优化调度方法的17.6元;而场景2中,余电上网模式已达到Ⅲ档电价,双层滚动运行策略和传统调度方法均处于Ⅱ档电价,采用双层滚动运行策略的日运行成本3.579元低于传统优化调度方法的11.4元;场景2中,其他方

法均处于Ⅲ档电价,本文双层滚动运行策略仍处于Ⅱ档电价,其日运行成本为-1.512元(即收益1.512),低于其他方法的日运行成本。根据上述分析可知,采用本文的策略虽然在前期Ⅰ档电价时日运行成本高于传统的调度方法,但随着时间的推移,传统的调度方法在达到Ⅲ档电价时,本文的调度策略仍然处于Ⅱ档电价,日运行费用低于传统的调度方法。最后将余电上网和传统的调度方法的日运行收益分别进行累加得到的年收益也均低于本文调度策略下的年收益,采用本文调度策略获得的年收益比传统优化调度方法高11%。

根据图10可知,MPC双层滚动优化运行策略延缓了阶梯电价节点的到来,Ⅱ档电价和Ⅲ档电价的时间节点分别为5 019 h和8 453 h,虽然双层滚动优化运行策略的Ⅱ档电价节点相对于传统的调度方法提前了175 h,但Ⅲ档电价节点推迟了1 056 h,使用户在很长时间内使用的都是较低的电价,为用户节省了大量的电费。

3.4 不同居民用电量收益分析

为了验证算法的一般性,针对不同用电量的居民分别进行其年收益优化计算。主要考虑用电量可达到Ⅲ级电价的居民,用电量最低为5 000 kW·h,最高用电量11 000 kW·h,普通住宅用户的光伏和储能电池的容量仍为6 kW·h和10.5 kW·h。图11展示了不同用电量居民的年收益。

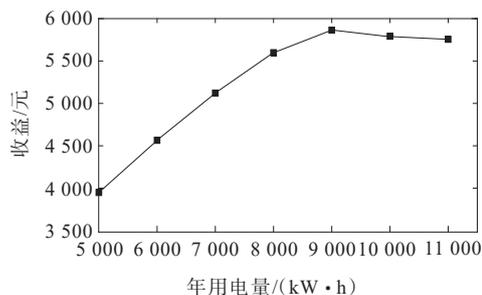


图11 装备光-储系统的居民年用电量和收益分析

Figure 11 Analysis of annual electricity consumption and revenue of residents using PV-energy storage system

根据图11可知,在给定的光-储系统的容量下,随着居民用电量的增加,用户的收益也逐渐提高,在用户年用电量为9 000 kW·h时获得最大收益5 864元,当居民年用电量超过10 000 kW·h时,由于光伏和储能容量不足,系统的可调度量不足,用户的经济效益会逐渐下降。综上,用电量为6 000~9 000 kW·h的普通住宅居民采用本文的双层滚动优化运行策略可获得较好的经济效益。

4 结语

本文针对户用型光-储系统,以居民阶梯-峰谷电价体系为背景提出了一种以最优年收益为目标的户用光-储系统的MPC双层滚动优化运行策略。主要结论如下。

1) 户用光-储系统的MPC年滚动优化基于长期预测信息和MPC日内滚动优化结果的实时更新,生成小时级的运行计划,并进行15 min尺度的实时控制,有效地推迟了用户达到Ⅲ档电价的时间节点,提高了用户的收益。

2) MPC的双层滚动优化模型可以很好地处理光伏、负荷预测的不确定性和居民电价变化的因素,通过Informer模型进行长期预测,从而利用长时间尺度中更多的可用信息,给用户的长期用电策略提供参考。

3) 本文所提算法和结论对于整县光伏或分布式发电的建设有很好的促进作用,具有较强的应用前景,不足之处在于在计算年滚动优化时,较长的预测域导致计算时间偏长和预测准确度较差。后续研究方向是优化模型和缩短年滚动优化计算时间。

参考文献:

- [1] 李建林,方知进,谭宇良,等.电化学储能系统在整县制屋顶光伏中应用前景分析[J].太阳能学报,2022,43(4):1-12.
LI Jianlin, FANG Zhijin, TAN Yuliang, et al. Application prospect analysis of electrochemical energy storage technology in county-wide rooftop photovoltaic system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 1-12.
- [2] 伏祥运,汤国晟,崔红芬,等.基于DAB的光储型混合系统功率调节与控制[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):138-143.
FU Xiangyun, TANG Guosheng, CUI Hongfen, et al. Study on power regulation and control based on DAB for a hybrid system with photovoltaic and storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 138-143.
- [3] 董广凯,黄嵩,董佳林,等.定功率跟踪控制的光伏并网低电压穿越策略[J].高压电器,2023,59(3):93-98.
DONG Guangkai, HUANG Song, DONG Jialin, et al. Low voltage ride-through strategy of grid-connected photovoltaic generation with constant power tracking control[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 93-98.
- [4] 杨晓辉,杨爽,徐正宏,等.计及灵活配电单元的分布式

- 电源优化配置方法[J].电力工程技术,2023,42(1):19-25.
YANG Xiaohui, YANG Shuang, XU Zhenghong, et al. Optimal configuration method of distributed generation considering flexible distribution unit[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 19-25.
- [5] 黄梦旗,李勇汇,曾海燕,等.计及高渗透率分布式电源的韧性配电网数据驱动鲁棒规划方法[J].电力建设,2023,44(6):79-90.
HUANG Mengqi, LI Yonghui, ZENG Haiyan, et al. Data-driven robust planning method for resilient distribution networks considering high-permeability distributed generation[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 79-90.
- [6] 姜欣,刘萌,王天梁,等.电网侧储能电站参与现货联合市场的竞价策略[J].电网技术,2021,45(9):3398-3408.
JIANG Xin, LIU Meng, WANG Tianliang, et al. Bidding strategy for grid-side energy storage power stations to participate in the spot joint market[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3398-3408.
- [7] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(增刊1):28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (Sup 1): 28-51.
- [8] 林俐,许冰倩,王皓怀.典型分布式发电市场化交易机制分析与建议[J].电力系统自动化,2019,43(4):1-8.
LIN Li, XU Bingqian, WANG Haohuai. Analysis and recommendations of typical market-based distributed generation trading mechanisms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 1-8.
- [9] 李菁,王志新,严胜,等.计及舒适度的家庭能量管理系统优化控制策略[J].太阳能学报,2020,41(10):51-58.
LI Jing, WANG Zhixin, YAN Sheng, et al. Optimal operation of home energy management system considering user comfort preference[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(10): 51-58.
- [10] WANG Y Z, LIN X, PEDRAM M. A near-optimal model-based control algorithm for households equipped with residential photovoltaic power generation and energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 77-86.
- [11] 戴璐平,吴薇,黄蓓雯.考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J].电力系统保护与控制,2019,47(3):48-55.
DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwen. Optimal energy scheduling for family grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty[J]. Power System

- Protection and Control,2019,47(3):48-55.
- [12] KIKUSATO H, MORI K, YOSHIKAWA S, et al. Electric vehicle charge-discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(3):3186-3197.
- [13] FUJIMOTO Y, KIKUSATO H, YOSHIKAWA S, et al. Distributed energy management for comprehensive utilization of residential photovoltaic outputs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(2):1216-1227.
- [14] 刘旭菲,彭丽莎,黄松岭. 基于模型预测控制的家庭能量管理优化调度方法研究[J]. 电测与仪表,2024,61(10):26-32.
LIU Xufei, PENG Lisha, HUANG Songling. Optimized dispatching strategy of home energy management system based on model predictive control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(10):26-32.
- [15] 孙韩,陈宗海,武骥. 计及电动汽车不确定性的家庭微电网实时能量调度策略[J]. 电网技术,2019,43(7):2544-2551.
SUN Han, CHEN Zonghai, WU Ji. Online energy dispatch strategy for residential microgrid considering uncertainty of electric vehicle[J]. Power System Technology,2019,43(7):2544-2551.
- [16] LIAN Y Z, JIANG Y N, JONES C N, et al. Scheduling delays and curtailment for household appliances with deterministic load profiles using MPC[J]. IEEE Control Systems Letters,2022,6:3301-3306.
- [17] ZHENG Z, PAN J, HUANG G S, et al. A bottom-up intra-hour proactive scheduling of thermal appliances for household peak avoiding based on model predictive control[J]. Applied Energy,2022,323:119591.
- [18] 窦晓波,晓宇,袁晓冬,等. 基于改进模型预测控制的微电网能量管理策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):56-65.
DOU Xiaobo, XIAO Yu, YUAN Xiaodong, et al. Energy management strategy based on improved model predictive control for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(22):56-65.
- [19] 赵良德,梁晓伟,庄磊,等. 电力市场下的分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(4):109-115.
ZHAO Liangde, LIANG Xiaowei, ZHUANG Lei, et al. Distributed model predictive load frequency control in electricity market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):109-115.
- [20] 翟桥柱,周玉洲,李轩,等. 非预期性与全场景可行性:应对负荷与可再生能源不确定性的现状、挑战与未来[J]. 中国电机工程学报,2020,40(20):6418-6433.
ZHAI Qiaozhu, ZHOU Yuzhou, LI Xuan, et al. Nonanticipativity and all-scenario-feasibility: state of the art, challenges, and future in dealing with the uncertain load and renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(20):6418-6433.
- [21] LEI M Y, YANG Z L, WANG Y B, et al. An MPC-based ESS control method for PV power smoothing applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(3):2136-2144.
- [22] NAIR U R, SANDELIC M, SANGWONGWANICH A, et al. An analysis of multi objective energy scheduling in PV-BESS system under prediction uncertainty[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2276-2286.
- [23] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach, USA, 2017:6000-6010.
- [24] ZHOU H Y, ZHANG S H, PENG J Q, et al. Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021, 35(12): 11106-11115.
- [25] 陈亭轩,徐潇源,严正,等. 基于深度强化学习的光储充电站储能系统优化运行[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):90-98.
CHEN Tingxuan, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Optimal operation based on deep reinforcement learning for energy storage system in photovoltaic-storage charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):90-98.