

考虑储能电池寿命影响的源网荷储协同调度策略

王晓慧^{1,2,3}, 崔世界^{1,2}, 杨超⁴, 王悦⁵

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110006; 5. 辽宁省气象装备保障中心, 沈阳 110166)

摘要: 本文提出了一种基于双层优化模型的源网荷储协同调度策略,在最小化园区内负荷用电成本的同时延长储能电池的使用寿命。上层优化模型通过分时电价对能源供给进行调度,调度风光发电、储能电池和电网之间的能量流动。下层优化模型则基于遗传算法,针对每块储能电池的充放电行为进行调度,最小化电池寿命衰减。实验结果表明,所提出的双层优化模型在购电成本和电池寿命管理方面均表现出优越性,相比传统的单目标优化方法或基于规则的单层调度策略,能有效提高系统经济效益和系统稳定性。该研究为能源管理系统在实际园区的应用提供了一个高效的调度框架,具有重要的理论意义和实际应用价值。

关键词: 电池寿命; 经济成本; 双层调度; 策略优化

Source-grid-load-storage Collaborative Scheduling Strategy Considering the Impact of Energy Storage Battery Life

WANG Xiaohui^{1,2,3}, CUI Shijie^{1,2}, YANG Chao⁴, WANG Yue⁵

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China; 5. Liaoning Provincial Meteorological Equipment Support Center, Shenyang 110166, China)

Abstract: In this paper, a source-grid-load-storage(SGLS)cooperative scheduling strategy based on a double-layer optimization model is proposed with purpose of minimizing the electricity cost for loads in parks while extending the life time of energy storage battery. The upper-payer optimization model schedules energy supply through time-of-use electricity pricing, coordinates the energy flow among wind power, photovoltaic generation, energy storage batteries and the grid. The lower-layer optimization model is based on a genetic algorithm, schedules the charging and discharging behavior of each energy storage battery to minimize life degradation of battery. The experimental results show that the proposed double-layer optimization model exhibits superior performance in both electricity purchasing cost and battery lifespan management. The model, compared to traditional single-objective optimization methods or rule-based single-layer scheduling strategies, can effectively enhance system economic efficiency and system stability. This research has provided an efficient scheduling framework for the application of energy management systems in practical parks, offering significant theoretical and practical value.

Keywords: lifetime of battery; economic cost; double-layer scheduling; strategy optimization

0 引言

随着全球能源结构的转型和碳中和目标的提

出,可再生能源(如光伏、风电)在能源系统中的占比逐年增加^[1]。园区作为能源消耗的主要场所,其能源系统的优化调度对于实现节能减排具有重要

意义。然而,可再生能源的间歇性和不确定性以及生产负荷的波动性^[2]给能源调度带来了巨大的挑战。为了应对这一挑战,在园区中,源网荷储联合调度已经成为一种重要的能源管理模式^[3]。通过合理调度新能源发电、储能系统充放电和电网购电,在满足负荷需求的同时最大化可再生能源的利用率,最小化用电成本。

近年来,国内外研究者对源网荷储联合调度问题展开了广泛研究,研究方法主要可分为以下3类:首先是单目标经济性优化,文献[4-6]以最小化经济成本为目标,构建电力系统优化模型,分析源网荷储最优动态潮流特性,然而,此类方法未考虑电池寿命等因素,导致调度策略的局限性。其次是多目标协同优化,文献[7-9]引入多目标优化算法平衡经济性与可靠性,采用鲁棒优化和预测算法来处理风光出力的不确定性,然而,多目标优化算法的目标函数权重需要人工设定,难以动态适应复杂工况。最后是规则与人工智能相结合的方法,文献[10-12]提出深度强化学习算法,通过试错学习优化储能充电行为,尽管此类方法适应性较强,但其黑箱特性会导致策略的可解释性不足。

近年来,针对储能电池寿命衰减的建模研究逐渐深入。文献[13]基于电化学机理构建了电池老化成本模型,量化了充放电深度(depth of discharge, DOD)和荷电状态(state of charge, SOC)波动对寿命的影响;文献[14]提出应力认知最佳电池调度框架,通过限制电池充放电速率和SOC范围降低寿命损耗;文献[15]考虑循环深度和SOC应力因素,通过雨流计数法分析电池的老化模型;文献[16]系统总结了基于容量衰减率和阻抗增长的寿命评估框架;文献[17]提出以等效全循环次数作为电池寿命损耗指标,结合放电深度与温度因子构建多目标优化模型。然而,现有模型多聚焦于单一电池单元的优化,未充分耦合至上层能源调度框架中。

尽管已有研究在源网荷储联合调度方面取得显著进展,但仍然存在以下不足:一方面,当前研究大多仅考虑经济性优化目标,忽略了电池寿命损耗对系统长期运行的影响;另一方面,现有方法通常采用单层模型优化,对于源网荷储的协同调度与储能电池的充放电调度多采用简化模型,未充分考虑源网荷储调度策略与储能电池充放电调度策略之间的关系,没有兼顾调度经济性与电池寿命。

针对上述问题,本文提出一种双层优化模型,在上层以最小化经济成本为目标,对源网储为负荷的用电情况进行调度分配,同时将储能调度结果传递给下

层;在下层以最小化储能电池寿命损耗为目标,对单块储能电池充放电策略进行调度,并将储能电池寿命变化反馈给上层以调整上层源网储供电分配。通过上下层协调互动,在满足负荷用电需求的同时,最小化购电成本最大限度延长储能电池的使用寿命。

1 系统描述

园区源网荷储系统见图1,该系统主要由光伏阵列、风机、交流负载、储能柜、逆变器模块及调度系统组成。在该系统中,新能源发电优先为负荷供电,剩余电量由储能柜存储,用于电网电价峰时段的负荷供电;若新能源发电量不足,则从电网购电以保证负荷用电。储能柜在电网电价谷时段充电,达到利用峰谷电价差节省经济成本的目的。储能柜由多块储能电池组成,每块电池的充、放电行为独立控制,但是储能柜的充、放电量为柜中各块电池的充、放电之和。

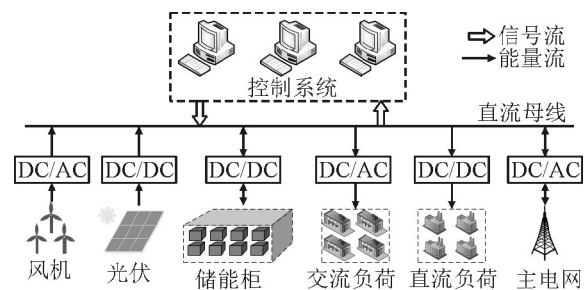


图1 园区内源网荷储系统
Fig. 1 Source-grid-load-storage system in the park

1.1 风力发电

风机发电是利用风能驱动风机叶片旋转,进而通过机械传动系统带动发电机转子转动,将风能转化为电能的一种发电技术^[18]。在本研究中,风机发电的波动性与不确定性对园区整体调度影响较大。一方面风机出力的实时水平会直接决定上层优化模型中从电网购电与储能放电的分配策略;另一方面,风力的波动会情况会影响下层储能电池的充放电切换状态,进而影响电池的寿命损耗。基于此,本文首先对风机发电建立数学模型,为后续的协同调度奠定基础。风机的输入功率为

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; v 为风速; R 为风机叶片的半径; A 为风机叶片迎风扫掠的面积^[19]。风机的输出功率为

$$P_t^{WT} = C_p P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2)$$

式中: C_p 为风能利用系数; P_t^{WT} 将在上层优化模型

中作为可再生能源输入。

1.2 光伏发电

光伏发电是利用光伏电池对光能的电荷分离现象直接将太阳能转化为电能的一种太阳能发电技术^[20-21],太阳辐射强度和环境温度是影响光伏发电的主要因素。光伏发电具有昼夜间歇性和天气依赖性,在上层调度中,光伏发电量的变化决定白天时段储能系统充电的可能性,从而影响日间峰时段的电网购电量;在下层模型中,如果风光发电量长期低于负荷用电量,则需要提高电池的放电深度来保障负荷运行,进而影响电池寿命损耗。光伏发电的公式为

$$P_t^{\text{PV}} = P_{\text{STC}} G_{\text{AC}} \frac{1 + \delta(T_c - T_r)}{G_{\text{STC}}} \quad (3)$$

$$T_c = T_e + 30G_{\text{AC}}/1000 \quad (4)$$

式中: P_t^{PV} 为光伏输出功率,为上层调度的输入功率; P_{STC} 为测试条件下 (G_{STC}, T_c) 下的最大测试功率; G_{AC} 为辐射强度; δ 为功率温度系数,一般取 $-0.47\%/\text{K}$; T_c 为光伏板的工作温度; T_r 为参考温度,一般取 $25\text{ }^\circ\text{C}$; G_{STC} 为标准测试条件下的辐射强度,一般取 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$; T_e 为环境温度。

1.3 储能系统

储能系统 (energy storage system, ESS) 在能源调度过程中起着至关重要的作用,它能够平滑可再生能源波动^[22],减少峰谷差距,降低电力成本。ESS 在 t 时段的充放电功率表示为 P_t^{ESS} , 当 P_t^{ESS} 为正时,表

$$\Delta S_t = \begin{cases} 1 \times 10^{-4} \times \frac{\text{DOD}_t}{50\%} + M_t, & \text{DOD}_t \leq 50\%, 30\% \leq \text{SOC}_t \leq 80\% \\ 1 \times 10^{-4} \times \frac{\text{DOD}}{50\%} \times (1 + 5\%) + M_t, & \text{DOD}_t \leq 50\%, \text{SOC}_t < 30\% \text{ 或 } \text{SOC}_t > 80\% \\ 1 \times 10^{-4} + M_t, & \text{DOD}_t > 50\%, 30\% \leq \text{SOC}_t \leq 80\% \\ 1 \times 10^{-4} \times (1 + 5\%) + M_t, & \text{DOD}_t > 50\%, \text{SOC}_t < 30\% \text{ 或 } \text{SOC}_t > 80\% \end{cases} \quad (8)$$

$$M_t = \begin{cases} 1 \times 10^{-6}, & \text{DOD}_t > 0, \text{SOC}_{t+1} \leq \text{SOC}_t, \text{ } t \text{ 时刻为充电状态} \\ 1 \times 10^{-6}, & \text{DOD}_t > 0, \text{SOC}_{t+1} \geq \text{SOC}_t, \text{ } t \text{ 时刻为放电状态} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔS_t 为在 t 时段电池寿命的损耗; M_t 为切换充放电状态时额外的寿命损耗。设电池的初始寿命为 1,任意一块电池进行 n 小时充放电后剩余的寿命为

$$S_n = 1 - \sum_{t=1}^n \Delta S_t \quad (10)$$

2 模型求解

本文采用双层协同优化方法调度园区用能,总体调度思路见图 2。首先,建立园区源网荷储数学模

示储能系统正在向外部负载供应电能, P_t^{ESS} 为负时,表示储能系统从电网或者发电设备获取电能。在运行过程中,储能系统不能同时进行充电和放电操作。储能系统在任意时刻的充放电功率约束为

$$-P_{\text{max}}^{\text{ESS}} \leq P_t^{\text{ESS}} \leq P_{\text{max}}^{\text{ESS}} \quad (5)$$

式中, $P_{\text{max}}^{\text{ESS}}$ 为储能系统的最大充放电功率。

荷电状态 (SOC) 是用于评估电池充放电状态和剩余可用电量的重要指标^[23],通过实时监控 SOC 能够调整 ESS 的调度策略,继而影响生产的用电成本。ESS 在 t 时段的 SOC 可表示为 SOC_t ^[24]

$$\text{SOC}_t = \begin{cases} \text{SOC}_{t-1} - \alpha \times P_t^{\text{ESS}} \times \eta_{\text{ch}}^{\text{ESS}} \times \Delta t / S^{\text{ESS}}, & P_t^{\text{ESS}} \geq 0 \\ \text{SOC}_{t-1} - (1 - \alpha) \times P_t^{\text{ESS}} \times \Delta t / (S^{\text{ESS}} \times \eta_{\text{dis}}^{\text{ESS}}), & P_t^{\text{ESS}} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\eta_{\text{ch}}^{\text{ESS}}$ 和 $\eta_{\text{dis}}^{\text{ESS}}$ 是 ESS 的充电效率和放电效率; S^{ESS} 是 ESS 的额定能量容量; $\alpha=1$ 表示 ESS 运行于放电状态, $\alpha=0$ 表示 ESS 运行于充电状态; Δt 是 t 时段持续的时长。

SOC 应保持在安全的范围内^[25],公式为

$$\text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{\text{max}} \quad (7)$$

式中, SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别是 ESS 能够正常运行时的最大值和最小值。电池的放电深度^[26](DOD)是放电容量与额定容量之比的百分数。电池在使用过程中会出现由于过充、过放引起的寿命损失。当电池进行过充、过放以及深度充放电操作时,电池的寿命损耗会加剧^[27],电池的寿命消耗量为

型,设计模型参数、目标函数、约束条件;其次,采用双层协同优化方法进行求解,在上层以最小化园区的用电成本为目标,采用混合整数线性规划^[28](mixed-integer linear programming, MILP)优化风机、光伏、储能和电网的功率分配,满足负荷需求。在下层以最小化储能电池寿命损耗为目标,采用遗传算法^[29]优化储能柜中每块电池的充放电策略。上层调度的输出作为下层调度的输入,下层调度的输出反馈给上层调度以持续优化上层调度策略。不断迭代,产生最优解。

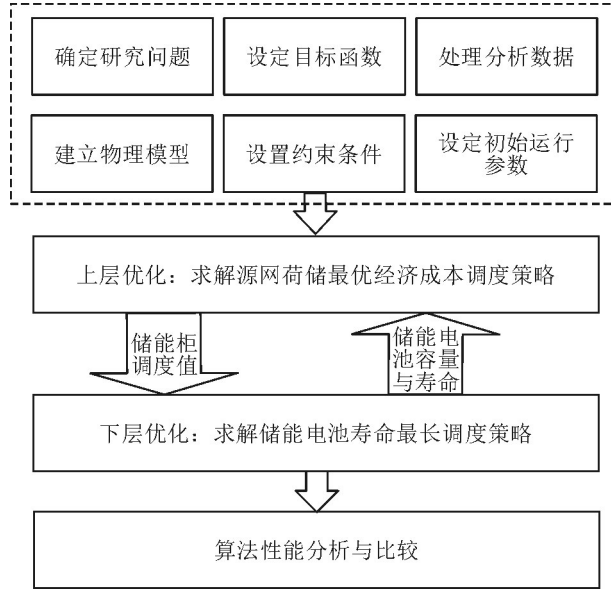


图2 双层协同优化总体调度思路
Fig. 2 Overall scheduling framework of double layer cooperative optimization

2.1 目标函数

上层调度以最小化园区购电成本为目标,目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^T C_t^{\text{MG}} \times (P_t^{(\text{MG},\text{L})} + P_t^{(\text{MG},\text{ESS})}) \quad (11)$$

式中,电网的分时电价为 C_t^{MG} ,单位为 CNY/kW·h。

下层调度以最小化储能电池寿命损耗为目标,目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^N \Delta S_{(i,t)}^{\text{battery}} \quad (12)$$

式中: $\Delta S_{(i,t)}^{\text{battery}}$ 为第 i 块电池在时段 t 的寿命损耗; N 为储能柜中电池的总块数。

2.2 决策变量

上层调度的决策变量为各时段内的功率调度,决策变量含义见表1。

表1 上层调度的决策变量
Table 1 Decision variables in the upper-level scheduling

决策变量	含义
$P_t^{(\text{PV},\text{L})}$	光伏向负荷的供电功率
$P_t^{(\text{PV},\text{ESS})}$	光伏向储能的供电功率
$P_t^{(\text{WT},\text{ESS})}$	风机向负荷的供电功率
$P_t^{(\text{WT},\text{L})}$	风机向储能的供电功率
$P_t^{(\text{ESS},\text{L})}$	储能向负荷的供电功率
$P_t^{(\text{MG},\text{L})}$	电网向负荷的供电功率
$P_t^{(\text{MG},\text{ESS})}$	电网向储能的供电功率

下层调度以最小化储能电池寿命损耗为目标,下层调度的决策变量为每块电池的充放电功率

$P_{(t,i)}^{\text{battery}}$, 且充电和放电不能同时发生,具体为

$$P_{(t,i)}^{\text{battery}} = \begin{cases} > 0, & \text{储能柜放电} \\ = 0, & \text{储能不充不放} \\ < 0, & \text{储能柜充电} \end{cases} \quad (13)$$

2.3 约束条件

上层调度应满足电力平衡约束:每个时段负荷需求 P_t^{L} 由光伏、风机、储能和电网供电满足,其公式为

$$P_t^{(\text{PV},\text{L})} + P_t^{(\text{WT},\text{L})} + P_t^{(\text{ESS},\text{L})} + P_t^{(\text{MG},\text{L})} = P_t^{\text{L}}, t = 1, 2, \dots, T \quad (14)$$

光伏在每个时段向负荷和储能的供电功率应小于该时段光伏发电的总功率 P_t^{PV} 为

$$P_t^{(\text{PV},\text{L})} + P_t^{(\text{PV},\text{ESS})} \leq P_t^{\text{PV}} \quad (15)$$

风机在每个时段向负荷和储能的供电功率应小于该时段风机发电的总功率 P_t^{WT} 为

$$P_t^{(\text{WT},\text{L})} + P_t^{(\text{WT},\text{ESS})} \leq P_t^{\text{WT}} \quad (16)$$

储能柜充放电功率应小于其最大充放电功率 $P_{\text{max}}^{\text{ESS}}$ 为

$$P_t^{(\text{PV},\text{ESS})} + P_t^{(\text{WT},\text{ESS})} + P_t^{(\text{MG},\text{ESS})} = P_t^{\text{ESS}} \geq -P_{\text{max}}^{\text{ESS}} \quad (17)$$

$$P_t^{(\text{ESS},\text{L})} = P_t^{\text{ESS}} \leq P_{\text{max}}^{\text{ESS}} \quad (18)$$

储能柜 $t+1$ 时刻的荷电状态 SOC_{t+1} 与 t 时刻储能柜的荷电状态 SOC_t 有关^[30],计算公式为

$$\text{SOC}_{t+1} = \text{SOC}_t + \Delta t \times (P_t^{(\text{PV},\text{ESS})} + P_t^{(\text{WT},\text{ESS})} + P_t^{(\text{MG},\text{ESS})} - P_t^{(\text{ESS},\text{L})}) / E_{\text{ESS}} \quad (19)$$

式中, E_{ESS} 为储能柜的总容量。

荷电状态 SOC_t 的上下限约束为

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{\max} \quad (20)$$

下层调度中,储能柜中每块电池的充放电功率之和等于上层调度中储能柜的充放电功率,公式为

$$\sum_{i=1}^N P_{(t,i)}^{\text{battery}} = \begin{cases} P_t^{(\text{ESS},\text{L})}, & P_t^{\text{ESS}} > 0 \\ 0, & P_t^{\text{ESS}} = 0 \\ P_t^{(\text{PV},\text{ESS})} + P_t^{(\text{WT},\text{ESS})} + P_t^{(\text{MG},\text{ESS})}, & P_t^{\text{ESS}} < 0 \end{cases} \quad (21)$$

单块电池充放电应满足

$$-P_{\text{max}}^{\text{battery}} = P_{(t,i)}^{\text{battery}} \leq P_{\text{max}}^{\text{battery}} \quad (22)$$

单块电池的荷电状态应满足

$$-\text{SOC}_{\text{max}}^{\text{battery}} = \text{SOC}_{(t,i)}^{\text{battery}} \leq \text{SOC}_{\text{max}}^{\text{battery}} \quad (23)$$

2.4 求解方法

本文采用双层优化方法为园区负荷运行提供调度策略,最小化园区购电成本和储能电池寿命损耗,具体的求解过程见图3。

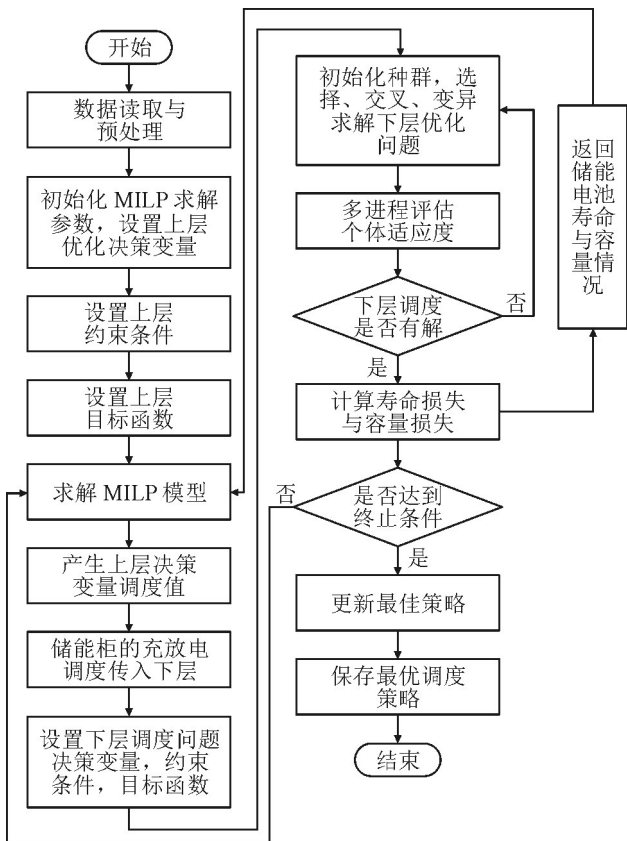


图3 双层优化方法的具体求解过程
Fig. 3 Specific solution process of the double layer optimization method

步骤1:数据读取与初始化设置,获取园区内光伏、风机的发电数据,园区内负荷用电数据,对数据进行标准化处理,制作成有效数据集;

步骤2:上层优化,求解经济成本最优调度策略
考虑分时电价,风光的发电功率和负荷的用电功率,采用 MILP 求解上层购电成本最小化的问题。初始化 MILP 的决策变量,设置优化范围;设置上层目标函数与约束条件;采用 CPLEX 求解器对问题进行求解,得到风、光、储、网对负荷的供电策略。同时将储能调度策略传递给下层,对电池充放电进行调度;

步骤3:下层优化,求解电池寿命最长调度策略,基于上层提供的储能柜总功率调度结果,采用遗传算法求解储能柜中每块电池的充放电策略;

步骤4:循环迭代,保留最优解,上下两层不断迭代循环,产生最优解并记录、保存结果。

3 实验与结果

3.1 研究案例

本文研究案例为东北地区某园区,该园区的风机装机容量为 2 MW、可供安装光伏板的屋顶面积为 1 000 m²。图 4 为风机和光伏发电功率情况,由

图可知,光伏发电随日照强度呈现拱桥状变化,具有明显的昼夜间歇性。风机出力受风速影响,波动性较大。

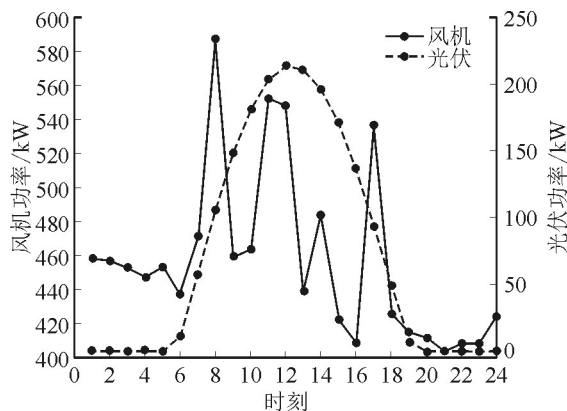


图4 典型日内风机和光伏发电功率情况
Fig. 4 Typical daily wind turbine and photovoltaic power generation condition

图 5 展示了园区内负荷用电功率和当地分时电价,由图可知园区负荷在峰时段用电功率相对较高,在谷时段用电功率相对较低,园区负荷用电峰谷差异明显。

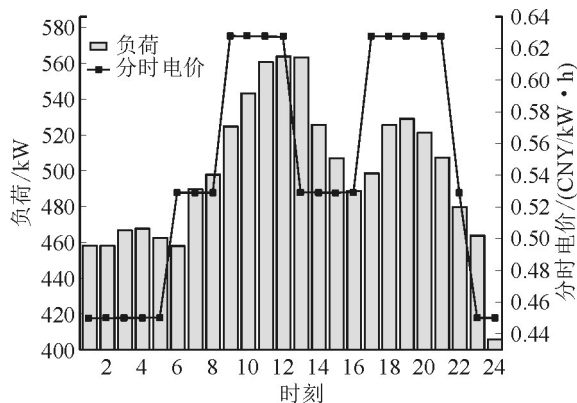


图5 园区日内负荷功率和分时电价
Fig. 5 Daily load power and time-of-use electricity pricing in the park

3.2 数据和结果

本研究将双层优化方法、单层优化方法进行对比,从经济效益、储能电池的寿命管理、新能源利用率对算法进行分析。

在经济效益方面,双层优化方法比基于规则的单层优化方法购电费用节省 8.12%。某典型日内 2 种方法各个时段的供电分配策略见图 6,采用双层优化调度策略会综合考虑储能电池的存储电量,更倾向于在夜间电价低时段给储能柜充电,以满足日间峰时段负荷用电需求,而基于规则的调度方法面对负荷波动时适应性较差,会按照既定规则进行调度,导致在购电费用较高的峰时段新能源出

力不足同时储能柜无电可放,使得从主电网的购电费用增加。

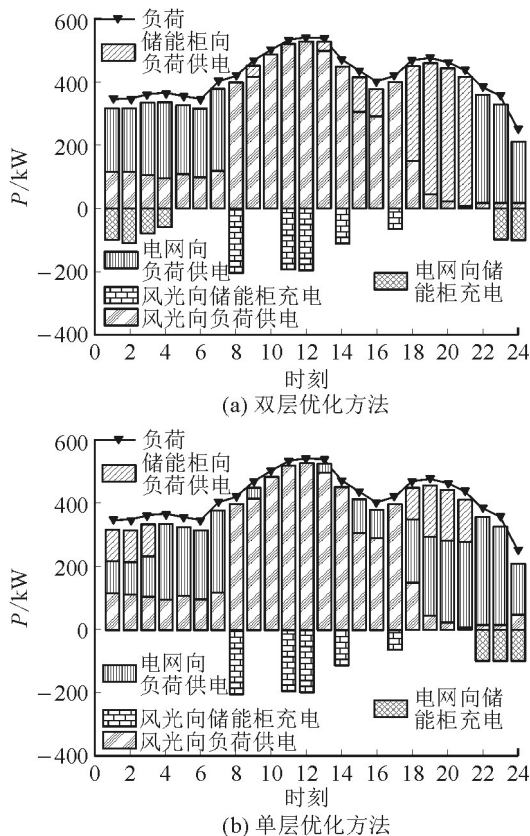


图6 不同时段供电分配策略

Fig. 6 Power supply allocation strategy at different time periods

在储能电池的寿命管理方面,采用双层优化方法和单层优化方法对于电池寿命损耗的影响见图7。假设电池的初始寿命为1,储能柜内120块电池初始寿命为120,电池的寿命在单日内损耗较小。以一个月为调度期,在31天744个时段对储能柜内每块电池的充放电进行管理,首先根据公式(8)计算电池寿命损耗 ΔS_i ,接着根据公式(9)计算电池由于不同时段充放电切换带来的额外寿命损耗 M_i ,最后根据公式(10)计算在744个时段结束后,储能柜内所有电池剩余寿命之和。采用双层优化算法和单层优化算法在调度期结束后储能柜内的剩余电池寿命分别为119.28和118.78,采用双层优化算法储能电池的寿命损耗为0.72,采用单层优化算法储能电池的寿命损耗为1.22。采用双层优化电池寿命衰减量小于单层优化。下层每块储能电池的充放电调度依据上层储能柜的充放电调度策略,在满足负荷供电需求的同时,减少充放电的切换频率,使得储能电池寿命延长。电池寿命损耗情况见图7。

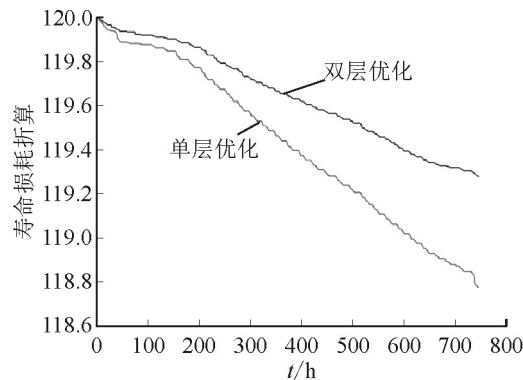


图7 电池寿命损耗情况
Fig. 7 Life loss of battery

在新能源利用方面,对源网储日内向负荷的供电情况分析如下:在双层优化算法中,风光、储能、主电网对负荷的供电占比分别为:46.34%,29.59%和24.07%;在单层优化算法中,风光、储能、主电网对负荷的供电占比分别为:40.85%,31.09%和28.06%。双层优化方法在新能源利用方面比单层优化方法提高了5.48%,实验结果验证了双层优化方法在新能源利用方面有显著优越性。

4 结语

考虑风光不确定性和负荷波动性,本文提出一种双层优化方法,该方法在上层以最小化经济成本为目标,考虑能量平衡、功率平衡等因素对源网荷储进行调度,在保证负荷稳定运行的前提下为生产节约购电成本,提高新能源利用率。在下层以储能电池寿命损耗最小化为目标,对储能电池的充放电进行调度,在保证储能柜供能稳定的情况下延长储能电池的寿命。通过东北地区真实的电力数据和园区负荷数据搭建模型,验证双层优化方法的稳定性和可靠性。本文提出的双层优化方法为生产企业的能源管理提供了可靠的思路和经验。

参考文献

- [1] ZHAO Xin, MA Xiaowei, CHEN Boyang, et al. Challenges toward Carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures[J]. Resources Conservation and Recycling, 2022, 176(1):105959.
- [2] YANG Chunhua, LIN Zhihong, HUANG Keke, et al. Manifold embedding stationary subspace analysis for nonstationary process monitoring with industrial applications[J]. Journal of Process Control, 2024, 140(8):103262.
- [3] 杨瑾,赵晓华,宋春,等.区域源网荷储一体化调控管理的模式研究[J]. 电工技术,2024(S2):442-444.
YANG Jin, ZHAO Xiaohua, SONG Chun, et al. Research on the model of integrated control and management of regional source network, load and storage[J]. Electric Engineering,

- 2024(S2):442-444.
- [4] 杨梅,周喜超,魏强,等.考虑经济效益目标的源网荷储综合能源系统动态最优能流优化研究[J].综合智慧能源,2022,44(11):63-69.
- YANG Mei, ZHOU Xichao, WEI Qiang, et al. Study on dynamic optimal energy flow of a source-network-load-storage integrated energy system considering its economic benefit[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(11):63-69.
- [5] 刘梦晨,郑华,秦立军,等.基于源网荷储综合调峰资源协同方案研究[J].电测与仪表,2022,59(8):127-132.
- LIU Mengchen, ZHENG Hua, QIN Lijun, et al. Research on the collaborative scheme of integrated peak shaving resources based on generation-grid-load-storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8):127-132.
- [6] 杨冬梅,王俊.考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J].电力建设,2021,42(10):28-39.
- YANG Dongmei, WANG Jun. Optimal dispatching for regional integrated electric and heating systems considering aggregation and transaction of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10):28-39.
- [7] 宋祉慧,田军见,倪战士,等.考虑可再生能源不确定性的风光火储联合调度优化[J].洁净煤技术,2024,30(8):117-127.
- SONG Zhihui, TIAN Junjian, NI Zhanshi, et al. Optimization of combined wind-solar-thermal-storage system considering the uncertainty of renewable energy output[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8):117-127.
- [8] BIAO F, YU F, QINGXI H, et al. Multi-objective optimization of an integrated energy system with high proportion of renewable energy under multiple uncertainties[J]. Energy Reports, 2023, 9(S10):695-701.
- [9] FU Xueqian, WU Xianping, ZHANG Chunyu, et al. Planning of distributed renewable energy systems under uncertainty based on statistical machine learning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1):41.
- [10] 席磊,全悦,刘治洪,等.基于自适应强化探索悲观Q的多智能体协同AGC算法[J].高电压技术,2023,49(6):2286-2296.
- XI Lei, QUAN Yue, LIU Zhihong, et al. Multi-agent collaborative AGC algorithm based on self-adaptive reinforcement-exploration maxmin Q[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2286-2296.
- [11] 刘思琪.基于深度强化学习的配电网分布式电压控制研究[D].南京:南京邮电大学,2022.
- [12] 王继业.人工智能赋能源网荷储协同互动的应用及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7667-7682.
- WANG Jiye. Application and prospect of artificial intelligence-empowered synergistic interaction in source-grid-load-storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21):7667-7682.
- [13] 刘剑,丁天祥,杜涛,等.计及储能电池寿命的工业园区经济调度模型[J].电网与清洁能源,2024,40(5):105-112.
- LIU Jian, DING Tianxiang, DU Tao, et al. The economical dispatch model for industrial parks considering the lifetime of energy storage batteries[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5):105-112.
- [14] SINGH A, PAREEK P, SAMPATH L P M I, et al. A stress-cognizant optimal battery dispatch framework for multimarket participation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(5):7259-7268.
- [15] LIU Z, WANG X, YANG K, et al. Analytical model of rain-flow-based cyclic aging for economic battery dispatch optimization[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(4):2425-2438.
- [16] 邹幽兰.基于退役锂动力电池容量、内阻和荷电状态的建模与参数估计[D].长沙:中南大学,2014.
- [17] 程苒,段瑶,吴亚雄,等.考虑等效循环放电深度约束的配电网储能规划[J].南方电网技术,2024,18(10):54-63.
- CHENG Ran, DUAN Yao, WU Yaxiong, et al. Energy storage planning of distribution network considering equivalent cyclic discharge depth constraints[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10):54-63.
- [18] WANG Y, LI G, ZHOU B, et al. Optimal dispatch strategy for virtual power plants with adjustable capacity assessment of high-energy-consuming industrial loads participating in ancillary service markets[J]. Sustainability, 2023, 15(13):10479.
- [19] 张明理,王璐,徐建源,等.风光储联合发电系统复合控制策略研究[J].高压电器,2018,54(1):64-72.
- ZHANG Mingli, WANG Lu, XU Jianyuan, et al. Research on compound control strategy of wind/PV/storage hybrid power generation system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):64-72.
- [20] 魏飞,许迪,陈鑫,等.基于机器学习的智能光伏充电桩能源调度系统研究[J].可再生能源,2025,43(2):268-274.
- WEI Fei, XU Di, CHEN Xin, et al. Research on intelligent photovoltaic charging station energy testing system based on machine learning[J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(2):268-274.
- [21] 孙立江.太阳能光伏发电技术的应用研究[J].中国设备工程,2025(3):241-243.
- [22] 桑丙玉,杨波,陶以彬,等.计及新能源功率概率分布特征的储能配置优化方法[J].可再生能源,2024,42(4):561-568.
- SANG Bingyu, YANG Bo, TAO Yibin, et al. An energy storage configuration optimization method considering power probability distribution characteristics of renewable energy[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(4):561-568.

quency control and heat supply[J]. Turbine Technology, 2023, 65(6):455-460.

- [25] LI Xiaozhu, CHEN Laijun, SUN Fan, et al. Share or not share, the analysis of energy storage interaction of multiple renewable energy stations based on the evolution game[J]. Renewable Energy, 2023, 208(5):679-692.

作者简介:

刘刚(1981—),男,工程师,主要研究方向为新能源高效利用。

张芳影(1984—),女,高级工程师,主要研究方向为高比例新能源系统运行调控。

李晓峰(1986—),男,高级工程师,主要研究方向为新能源低碳利用与高效运行。

刘双硕(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型储能运行模式。

李笑竹(1990—),女,通信作者,副教授,主要研究方向为新型电力系统优化调控与新型储能规模化应用。E-mail: 272268272@qq.com。

(上接第43页)

- [23] 胡耘. 动力电池荷电状态(SOC)估算方法综述[J]. 汽车实用技术, 2019(8):36-38.

HU Yun. Summary of methods for state of charge estimation of powerbatteries[J]. Automobile Technology, 2019(8):36-38.

- [24] GIBILISCO P, IEVA G, MARCONE F, et al. Day-ahead operation planning for microgrids embedding battery energy storage systems. a case study on the PrInCE lab microgrid [C]//2018 AEIT International Annual Conference. IEEE, 2018:1-6.

- [25] 贺悝, 冷肇星, 谭庄熙, 等. 考虑放电倍率的电池储能容量自适应SOC估计方法[J/OL]. 储能科学与技术, 1-12 [2025-02-28]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0080>.

HE Li, LENG Zhaoxing, TAN Zhuangxi, et al. Adaptive SOC estimation method for battery energy storage capacity considering discharge rate[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 1 - 12[2025 - 02 - 28]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0080>.

- [26] 牛远方, 冯天椽, 王成福, 等. 兼顾经济效益与寿命损失的含储能配电网多时间尺度协调调度[J]. 电力建设, 2024, 45(11):89-101.

NIU Yuanfang, FENG Tianyuan, WANG Chengfu, et al. Multi-time scale optimal dispatching method of active distribution network considering the influence of cycle life for energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11):89-101.

- [27] 李斌, 李博睿, 李超, 等. 考虑过充/过放的电化学储能电站建模及故障特性分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14):119-128.

LI Bin, LI Borui, LI Chao, et al. Modeling and fault characteristic analysis of electrochemical energy storage station

considering overcharging/overdischarging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14):119-128.

- [28] 樊会丛, 段志国, 陈志永, 等. 基于多智能体深度策略梯度的离网型微网双层优化调度[J/OL]. 中国电力, 2025:1-11 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20250214.0958.006.html>.

FAN H C, DUAN Z G, CHEN Z Y, et al. Two-layer optimal scheduling of off-grid microgrid based on multi-agent deep policy gradient[J/OL]. China Electric Power, 2025:1-11 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20250214.0958.006.html>.

- [29] 王子健. 微电网混合储能系统功率分配策略及容量优化配置研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2023.

- [30] 梁叶, 蔡孟冶, 姜岩峰, 等. 基于修正安时积分法的锂电池荷电状态估算[J/OL]. 电源学报, 1-13[2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20250214.1637.004.html>.

LIANG Ye, CAI Mengyi, JIANG Yanfeng, et al. State of charge estimation of lithium battery based on modified ampere-hour integral method[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-13[2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20250214.1637.004.html>.

作者简介:

王晓慧(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为微电网协同调度。E-mail:wangxiaohui3@sia.cn。

崔世界(1985—),男,副研究员,通信作者,主要研究方向为能源调度、边缘智能、人工智能。E-mail:cuishijie@sia.cn。

杨超(1988—),男,高级工程师,主要研究方向为电网数字化,人工智能,网络安全。

王悦(1979—),男,高级工程师,主要研究方向为雷电防御,雷电灾害风险评估,雷电灾害调查鉴定。