

园区微电网风光储协调优化配置

张嘉浩

长沙理工大学数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月11日; 发布日期: 2024年7月19日

摘要

在当前能源转型和可持续发展的背景下, 园区微电网的优化配置问题至关重要。本文深入研究了园区微电网中的风能、光伏和储能系统的协调优化配置, 提出了一个详细的数学模型和相应的优化算法。研究的主要目标是提高风能和光伏发电量的利用率, 减少弃电现象, 并优化储能系统的经济效益。具体来说, 本文首先建立了园区微电网中风能、光伏和储能系统的协调优化模型。通过该模型, 可以精确计算出不同情况下的发电量、用电量和储能需求。接着, 本文提出了一套粒子群优化算法, 通过该算法可以在不同运行模式下对微电网进行优化配置。本文详细分析了三种典型情景: 独立运行、联合运行和风光储协调配置。在独立运行情景下, 风能和光伏系统独立工作, 储能系统单独运行; 在联合运行情景下, 风能和光伏系统联合工作, 但不与储能系统协调; 在风光储协调配置情景下, 风能、光伏和储能系统实现高度协同工作。通过对这三种情景的详细分析, 本文评估了每种情景下园区能源配置方案的经济性和可行性。研究表明, 通过合理的优化配置, 可以显著提高风光电量的利用率, 减少电力浪费, 同时最大化储能系统的经济效益。基于这些分析结果, 本文制定了具体的优化策略, 为园区微电网的规划和运行提供了科学的决策支持。最终, 这些研究成果不仅有助于园区微电网的高效运行, 还为未来的能源转型和可持续发展提供了重要参考。

关键词

园区微电网, 风光储协调, 数学建模, 经济效益分析, 粒子群优化算法

Coordinate and Optimize the Allocation of Wind, Solar and Storage in the Park's Microgrid

Jiahao Zhang

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 11th, 2024; published: Jul. 19th, 2024

Abstract

In the current context of energy transition and sustainable development, the optimal allocation of campus microgrids is crucial. In this paper, the coordinated optimal configuration of wind, photovoltaic and energy storage systems in the campus microgrid is studied in depth, and a detailed mathematical model and corresponding optimization algorithm are proposed. The main objectives of the research are to improve the utilization of wind and photovoltaic power generation, reduce curtailment, and optimize the economic benefits of energy storage systems. Specifically, this paper first establishes a coordinated optimization model of wind, photovoltaic and energy storage systems in the campus microgrid. With this model, it is possible to accurately calculate the amount of power generated, the amount of electricity used, and the demand for energy storage under different scenarios. Then, this paper proposes a set of particle swarm optimization optimization algorithms, through which the microgrid can be optimally configured in different operating modes. This paper analyzes in detail three typical scenarios: independent operation, joint operation, and coordinated configuration of wind, solar, and storage. In the stand-alone operation scenario, the wind energy and photovoltaic systems work independently, and the energy storage system operates independently. In the joint operation scenario, wind and photovoltaic systems work together, but not in coordination with energy storage systems; In the scenario of coordinated allocation of wind, solar and storage, wind energy, photovoltaic and energy storage systems work highly together. Through a detailed analysis of these three scenarios, this paper evaluates the economics and feasibility of the energy allocation scheme in each scenario. The results show that the utilization rate of wind and solar power can be significantly improved, the power waste can be reduced, and the economic benefits of the energy storage system can be maximized through reasonable optimal allocation. Based on these analysis results, this paper formulates specific optimization strategies to provide scientific decision support for the planning and operation of campus microgrids. In the end, these research results not only contribute to the efficient operation of the campus microgrid, but also provide an important reference for future energy transition and sustainable development.

Keywords

Park Microgrid, Wind-Solar-Storage Coordination, Mathematical Modeling, Economic Benefit Analysis, Particle Swarm Optimization Algorithm

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 问题重述

1.1. 问题背景

我国于 2020 年提出了实现“碳达峰、碳中和”的双重碳减排目标，积极发展可再生能源并推动低碳电力的发展，这对于实施低碳行动具有重要意义。随着可再生能源的大规模接入电网，传统的电力系统的“供给侧”主动调节能力面临着一定的挑战，因此必须开发新的调节资源以确保电网的稳定运行。在全球碳中和目标的驱动下，各国都在积极推进能源转型，以减少温室气体排放和依赖化石燃料。实现碳中和需要大规模应用可再生能源，如风能和光伏发电，同时还需要提高能源利用效率和系统的灵活性。园区微电网作为一种新兴的分布式能源解决方案，通过将风能、光伏和储能系统相结合，能够在局部区

域内实现能源自给自足, 优化能源管理, 并提升能源系统的稳定性和经济性[1]。基于极限学习机算法预测风光储功率以及柔性负荷功率, 从时间角度出发, 先制定日前优化调度, 根据实时预测结果对日前优化调度结果采用粒子群算法进行滚动优化, 其优化调度的目标为成本最低、网损最小。仿真结果表明: 考虑柔性负荷的调峰能力、多目标函数、多时间尺度的优化调度方法能够有效提升含风光储综合能源的经济效益、社会效益, 增加了可再生新能源发电的消纳能力, 为源荷共同参与削峰填谷协调调度提供了参考。在这样的背景下, 研究园区微电网的风光储协调优化配置显得尤为重要。通过科学合理的配置和优化, 园区微电网可以最大限度地利用可再生能源, 减少碳排放, 降低能源成本, 提升能源系统的可靠性。

1.2. 问题描述

问题 1. 各园区独立运营储能配置方案及其经济性分析

系统结构如图 1 所示。以典型日风光发电功率为依据, 设园区从风电、光伏的购电成本分别为 0.5 元/kWh、0.4 元/kWh。

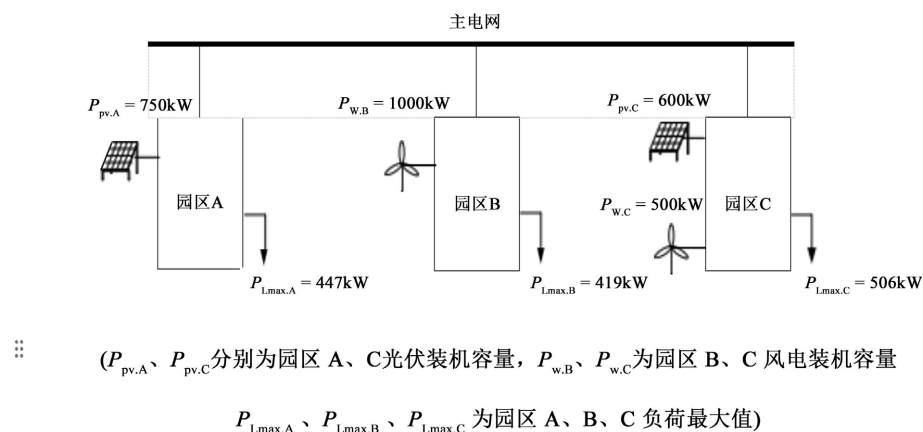


Figure 1. Schematic diagram of the structure of the microgrids in the three campuses that are independently connected to the main power grid

图 1. 三个园区微电网各自独立接入主电网结构示意图

1) 分析未配置储能时各园区运行的经济性, 包括: 购电量、弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本, 并分析影响其经济性的关键因素;

2) 各园区分别配置 50 kW/100 kWh 储能, 制定储能最优运行策略及购电计划, 分析各园区运行经济性是否改善, 并解释其原因;

3) 假设风光荷功率波动特性保持上述条件不变, 你认为 50 kW/100 kWh 的方案是否最优? 若是, 请给出分析依据; 若不是, 请制定各园区最优的储能功率、容量配置方案, 论证所制定方案的优越性。

问题 2. 联合园区储能配置方案及其经济性分析

若三个园区总发电与总负荷相均衡, 形成联合运营园区, 系统结构如图 2 所示。以典型日风光发电和负荷功率为依据, 设园区从风电、光伏的购电成本分别为 0.5 元/kWh、0.4 元/kWh。

1) 若未配置储能, 分析联合园区运行经济性, 包括: 联合园区的总购电量、总弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本;

2) 假设风光荷功率波动特性保持上述条件不变, 制定联合园区的总储能最优配置方案, 给出储能运行策略及购电计划, 分析其经济性;

3) 与各园区独立运营相比, 园区联合运营有何经济收益, 试分析导致经济收益改变的主要因素。

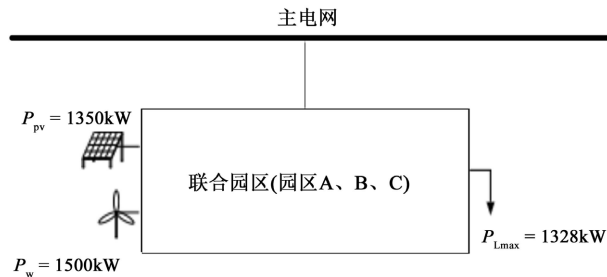


Figure 2. Schematic diagram of the joint access of microgrids in three parks to the main power grid

图 2. 三个园区微电网联合接入主电网结构示意图

问题 3. 园区风、光、储能的协调配置方案及其经济性分析

如果园区经理委托你制定园区未来的风光储协调配置方案, 并给出方案经济性分析论证报告。制定配置方案的条件: 三个园区的最大负荷增长 50%, 且负荷波动特性不变, 风电、光伏电源的配置成本分别为 3000 元/kW、2500 元/kW, 投资回收期按 5 年考虑。

1) 分别按各园区独立运营、联合运营制定风光储协调配置方案;

2) 按附件 3 给出的全年 12 个月典型日风光发电功率数据, 网购电采用如表 1 所示分时电价, 制定各园区独立运营的风光储协调配置方案。

Table 1. Time-of-use tariff

表 1. 分时电价表

时段	电价(元/kWh)
7:00~22:00	1
其余时段	0.4

2. 问题分析

在能源转型和可持续发展的背景下, 园区微电网的优化配置问题至关重要。园区微电网通过风力和光伏发电联合主电网为负荷供电。为了提高风光电量在总负荷中的占比, 园区需要配置较高比例的风光发电装机容量。然而, 由于园区负荷需求与风光发电功率的时间分布不匹配, 可能会导致部分发电量无法利用, 即出现弃电问题。为了解决这一问题, 配置储能系统成为一个有效的解决方案。储能系统能够在发电量过剩时储存电能, 并在需求高峰时释放, 从而平衡负荷发电功率的时序差异, 减少弃电现象。

然而, 电化学储能系统的成本较高, 因此在配置储能系统时需要综合考虑其投资与收益。具体来说, 需要评估储能系统在减少弃电、提高风光发电利用率和降低整体电力成本方面的收益, 是否能够抵消其高昂的初始投资和维护费用。这要求对储能系统的经济效益进行详细的分析, 包括对电价、政策补贴、技术进步等因素的考虑, 从而做出最优的投资决策。

总体而言, 虽然配置储能系统可以有效缓解园区负荷与风光发电功率的不匹配问题, 但其高成本使得需要进行全面的经济性分析, 以确保投资的合理性和收益的最大化。

2.1. 问题一的分析

题目第一问分析未配置储能时各园区运行的经济性。本文就首先定义购电量、弃风弃光电量、总供

电成本和单位电量平均供电成本四个指标计算公式，然后根据公式定义去计算相应的结果。最后为了筛选影响经济性的关键因素，本文选定通过让风电价格、光伏价格、主电站价格波动去分析不同园区用电成本的波动情况，最终判断出影响成本的关键因素。

题目第二问分析在配置 50 kW/100 kWh 储能时的储能最优运行策略及购电成本。本文以 SOC 允许范围 10%~90%、充放电效率 95% 等条件为约束条件，储能策略为决策变量，成本最低为目标函数求解，然后与第一问的成本进行对比。分析出各园区经济性是否改善。

题目第三问分析在风光和功率波动特性保持上述条件不变的前提下，50 kW/100 kWh 的方案是否最优。类似于第二问，本文增加决策变量储能设备容量。配置方案约束条件为目标函数与第二问一致，最后可求得最佳储能策略容量配置方案。

2.2. 问题二的分析

题目第一问计算联合园区的四个主要指标：总购电量、总弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本，利用问题一的计算公式计算并给出上述四个指标的具体数值。

题目第二问在保持风光荷功率波动特性不变的前提下，制定储能配置方案。我们要确保优化购电量，选择低电价时段购电，高电价时段使用储能系统供电。

题目第三问先对比联合园区配置储能前后与独立园区总和的对比结果。对结果进行比较，联合运营与独立运营的不同之处就在于园区范围的扩大，导致总光伏、风电装机容量的变化。最后分析导致经济收益改变的主要因素，能够显著影响总成本变化的因素。

2.3. 问题三的分析

题目第一问需要我们分别为各个园区制订风电、光伏和储能的协调配置方案，同时考虑独立运营和联合运营两种情况。可以利用问题二的模型，并新增风电和光伏两个决策变量，在目标函数中多考虑配置风电和光伏的成本。然后，通过粒子群优化算法(PSO)求解得到最优方案。具体来说，对于各园区独立运营的情况，每个园区需要单独优化其风电、光伏和储能的配置，目标是最小化其总成本，包括投资成本和运行成本。而对于联合运营的情况，所有园区共享风电、光伏和储能资源，目标是整个系统的总成本最小化，从而利用园区间的协同效应，提高资源利用效率。

题目第二问需要根据全年 12 个月的典型日风光发电功率数据，制定各园区独立运营的风光储协调配置方案，并且考虑分时电价(如表 1 所示)。这个问题相比第一问，需要多考虑分时电价的成本变化和不同月份典型风光发电数据的变化。另外，题目要求投资回报期为五年，即 60 个月的总成本回收。为此，在优化时不仅要考虑每个月的成本最小化，还要综合考虑五年的投资回报情况，确保配置方案在五年内回本。

3. 模型假设

- 1) 查阅资料真实无误。
- 2) 风力和光伏发电具有随机性和波动性，其输出功率和时间相关。
- 3) 园区负荷具有一定的时序规律，可以通过历史负荷数据进行建模和预测。
- 4) 储能系统有确定的充放电效率，并且储能系统有容量限制，包括最大充电功率和最大放电功率。
- 5) 每个园区微电网的发电、负荷和储能系统是独立运行和优化的。
- 6) 配置储能系统的收益主要减少弃电、降低购电成本和提高风光发电占比。
- 7) 储能系统的充放电行为遵循一定的策略，如根据负荷和发电情况进行优化调度。

4. 模型建立

4.1. 问题一

4.1.1. 各园区独立运营储能配置方案模型的建立

问题一第一问模型建立:

为便于理解,可将负荷视为需求量,发电量视为供给量,基于此对各园区运行时的经济性进行分析。根据附件 1 中各园区典型日负荷数据即可得到各园区日均购电量。即基本数学模型可以表达为:

$$B_i = -\int_0^t (p_{pv,i} \cdot n_i^1(t) dt + p_{w,i} \cdot n_i^2(t) dt - p_i^{cost}(t) dt) \left(\int_0^t p_{pv,i} \cdot n_i^1(t) dt + \int_0^t p_{w,i} \cdot n_i^2(t) dt - \int_0^t p_i^{cost}(t) dt \right) dt$$

根据上面购电量计算公式,由于此时未配置储能,故超出负荷值的多余电量便为弃风弃光电量。即基本数学模型可以表达为:

$$D_i = \int_0^t (p_{pv,i} \cdot n_i^1(t) dt + p_{w,i} \cdot n_i^2(t) dt - p_i^{cost}(t) dt) \left(\int_0^t p_{pv,i} \cdot n_i^1(t) dt + \int_0^t p_{w,i} \cdot n_i^2(t) dt - \int_0^t p_i^{cost}(t) dt \right) dt$$

根据上面电量计算公式,各园区可再生能源发电优先供给本区域负荷,不足部分从主电网购电,网购电价格为 1 元/kWh,园区从风电、光伏的购电成本分别为 0.5 元/kWh、0.4 元/kWh。即可以得到总供电成本数学模型:

$$\text{总成本} = 0.5 \times \text{风电购电量} + 0.4 \times \text{光伏购电量} + \text{主电网购电量}$$

$$w_i = B_i * price_{grid} + E_i^1(24) * price_{wind} + E_i^2(24) * price_{solar}$$

同理可以得到单位电量供电成本数学模型:

$$avgW_i = W_i / E_i(24)$$

问题一第二问模型建立:

根据题目所给数据制定储能最优运行策略及购电计划,是一个优化问题,需要确定决策变量、目标函数、约束条件,构建优化模型。最小化各园区购电总成本和风光发电成本,同时考虑储能系统的功率和能量成本的数学模型:

$$\begin{aligned} \min \sum_i \sum_t & (C_{grid} \cdot P_{grid,i,t} + C_{wind} \cdot P_{wind,i,t} + C_{solar} \cdot P_{solar,i,t}) \\ & + \sum_i \sum_t (C_{batt_power} \cdot P_{batt_charge,i,t} + C_{batt_energy} \cdot P_{batt_discharge,i,t}) \end{aligned}$$

该模型对应的约束条件包括能量平衡约束、储能电量变化约束、储能容量约束、储能功率约束、储能初始状态约束:

$$\begin{cases} L_{i,t} + P_{batt_charge,i,t} = P_{grid,i,t} + P_{wind,i,t} + P_{solar,i,t} + P_{batt_discharge,i,t} \\ E_{batt,i,t+1} = E_{batt,i,t} + \eta_{charge} \cdot P_{batt_charge,i,t} - \frac{P_{batt_discharge,i,t}}{\eta_{discharge}} \\ SOC_{min} \cdot E_{batt_max} \leq E_{batt,i,t} \leq SOC_{max} \cdot E_{batt_max} \\ 0 \leq P_{batt_charge,i,t} \leq P_{batt_max} \\ 0 \leq P_{batt_discharge,i,t} \leq P_{batt_max} \\ E_{batt,i,0} = E_{batt,i,T} \end{cases}$$

问题一第三小问模型建立:

第二问相比第三问仅需要增加两个决策变量储能装置的功率上限 P_{up} 和容量上限 E_{up} 。由于本文采用 SOC 值对电量范围进行约束, 故本文无需考虑容量上限带来的约束条件变化, 在 SOC 值计算中已经实际对 E_{up} 进行约束。模型与第二小问相同, 在程序中需要遍历不同的电池参数找到最优解。

4.1.2. 问题一的求解与分析

第一小问:

计算购电量公式为积分计算公式, 故本文采用复合梯形公式求解:

$$\int_a^b f(x)dx = (b-a) \cdot f\left(\frac{b-a}{2}\right)$$

根据前面的数学模型计算出四个指标计算结果, 结果如下表 2 所示。

Table 2. A summary table of the calculation results of each indicator

表 2. 各指标计算结果汇总表

	园区 A	园区 B	园区 C
购电量	4874.125	2432.3	2699.39
弃风弃光量	951.2	897.5	1128.02
总供电成本	6465.355	5519.900	5472.077
单位电量平均供电成本	0.8183	0.7159	0.7037

为了更直观的看出三个园区的购电量和弃电量的对比, 我们做出如下分析:

关键因素分析:

本文针对风电价格、光伏发电价格、主电站价格进行灵敏度分析, 分别控制一个变量变化, 其他变量与题目条件一致, 探究不同价格对不同园区影响。

从我们自己后续用 MATLAB 制作的三个图可以得出, 园区 A 对主电站价格更敏感、园区 B 对风电发电价格更敏感、园区 C 对主电站价格更敏感, 即园区 A 的关键因素是主电站价格, 园区 B 的关键因素是风电发电价格, 园区 C 的关键因素是主电站价格。

第二小问:

为提高其对于电网储能系统的控制效果, 提出基于改进粒子群算法的电网混合储能控制方法。本文采用粒子群优化算法求解上述优化模型[2]。粒子群优化算法(PSO)是一种基于群体智能的优化技术, 它借鉴了鸟群觅食、鱼群觅食等自然界群体行为的机制, 通过个体间的信息共享和协作来实现对问题的优化。PSO 算法广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制等领域。

PSO 算法简单易实现, 参数少, 计算量小; 收敛速度快, 适合大规模并行计算; 具有良好的全局搜索能力, 能够有效跳出局部最优。适用于各种优化问题, 尤其在大规模和高维搜索空间中表现优异。具体流程如下图 3 所示。

利用粒子群优化算法求解上述模型, 得到如下表 3 的结果。

从上表可以看出配置储能设备后三个园区的购电量、供电成本、弃风弃光量均下降, 经济性相关指标均趋于最优方向。即各园区配置储能设备后, 经济性都得到了明显改善。

第三小问:

利用粒子群优化算, 求解出结果如下表 4 所示。

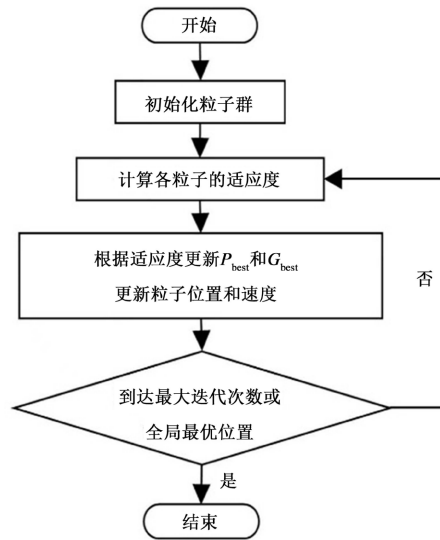


Figure 3. Flowchart of particle swarm optimization algorithm

图 3. 粒子群优化算法流程图

Table 3. Summary table of the calculation results of each index before and after the use of energy storage

表 3. 储能使用前后的各指标计算结果汇总表

(a)			
储能使用前			
	园区 A	园区 B	园区 C
购电量	4874.125	2432.300	2699.390
弃风弃光量	951.200	897.500	1128.020
总供电成本	6465.355	5519.900	5472.077
单位电量平均供电成本	0.818	0.716	0.704
(b)			
储能使用后			
	园区 A	园区 B	园区 C
购电量	4798.125	2252.800	2588.801
弃风弃光量	911.655	852.906	1098.446
总供电成本	6389.355	5335.700	5348.577
单位电量平均供电成本	0.809	0.692	0.688

Table 4. Summary table of the calculation results of each indicator after the energy storage capacity is changed

表 4. 更改储能容量后各指标计算结果汇总表

(a)			
50 kw/100 kWh			
	园区 A	园区 B	园区 C
购电量	4798.125	2252.800	2588.801
弃风弃光量	911.655	852.906	1098.446

续表

总供电成本	6389.355	5335.700	5348.577
单位电量平均供电成本	0.809	0.692	0.688
(b)			
更改储能容量后			
	园区 A	园区 B	园区 C
购电量	4684.125	2154.034	2534.891
弃风弃光量	801.128	1041.010	1431.127
总供电成本	6275.355	5241.634	5307.578
单位电量平均供电成本	0.794	0.680	0.683

通过计算得出各个园区最优方案对应的电池功率及储能：园区 A：56.006 kW/250 kWh、园区 B：100 kW/162.2614 kWh、园区 C：99.8385 kW/146.6854 kWh。从上表中可以看出，更改储能容量，总成本下降，但是部分园区的弃电量存在上升情况，因而 50 kW/100 kWh 的方案不是最优方案。所以实际应用可以从多方面考虑结果选出最优方案。

4.2. 问题二

4.2.1. 联合运营储能配置方案模型

问题二第一小问模型建立：

计算联合园区的总购电量、总弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本数学模型：

$$\text{总购电量： } B = -\int_{\sum_{i=1}^3 E_i(t)}^3 \sum_{i=1}^3 E_i(t)$$

$$\text{总弃风弃光电量： } D = \int_{\sum_{i=1}^3 E_i(t)}^3 \sum_{i=1}^3 E_i(t)$$

$$\text{总供电成本： } W_i = B * price_{grid} + E^1(t) * price_{wind} + E^2(t) * price_{solar}$$

$$\text{单位电量平均供电成本： } avgW = W/E(24)$$

问题二第二小问模型建立：

与问题一的第二小问类似，需要根据题目所给数据制定储能最优配置方案，确定决策变量，约束条件，构建优化模型，考虑储能电池参与后的总成本最小的数学模型：

$$\min W_i = b_i * price_{grid} + \sum_{k=1}^{24} \left((E_i^1(k+1) - E_i^1(k)) * price_{wind} + (E_i^2(k+1) - E_i^2(k)) * price_{solar} \right)$$

该模型对应的约束条件如下：

$$\begin{cases} 10\% \leq SOC_k \leq 90\% \\ SOC_k = SOC_{k-1} + P_k * T / E_{ug} * n_i \\ P_i \leq P_{up} \end{cases}$$

问题二第三小问模型建立：

主要是对联合运营和独立运营的结果进行比较。联合运营的不同之处在于园区范围的扩大，这导致总光伏和风电装机容量的变化。可以将联合运营视为一个新的园区 D。模型和第一题中的类似，只有变

量的取值范围有所改变。

4.2.2. 问题二分析与解决策略

根据题目要求计算联合园区的四个指标：总购电量、总弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本。根据第一小问的数学模型来计算这些指标，在风光荷功率波动特性保持不变的前提下，第二问要求我们为联合园区制定总储能的最优配置方案，并提供储能的运行策略和购电计划。

第一小问：

利用第一小问中的数学模型，计算出联合园区的总购电量、总弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本四个指标，并且同时与第一问的独立园区总和的情况计算结果进行对比，得出如下表 5 的结果所示。

Table 5. Summary table of the calculation results of each indicator before and after the union

表 5. 联合前后各指标计算结果汇总表

	联合园区	独立园区总和
购电量	8266.27	10005.815
弃风弃光量	1237.175	2976.72
总供电成本	15536.8675	17276.4125
单位电量平均供电成本	0.6643	0.7387

从表中可以看出联合园区总购电量、总弃风弃光电量、总供电成本和单位电量平均供电成本均低于独立园区总和，说明联合园区对于经济性方面十分有效。

第二小问：

利用粒子群优化算法求解上述优化模型得到最优解，联合园区储能电池 105.2343 kW/318.0858 kWh。然后计算得到各指标如下表 6。

Table 6. A summary table of the calculation results of each indicator before and after the energy storage is configured

表 6. 配置储能前后各指标计算结果汇总表

	配置储能前	配置储能后
购电量	8266.270	8051.048
弃风弃光量	1237.175	1248.510
总供电成本	15536.868	15287.343
单位电量平均供电成本	0.664	0.654

从上表可以看出，在配置储能后，联合园区的购电量、弃风弃光量、总供电成本和单位电量平均供电成本都显著下降，各项指标均趋于最经济的结果。这表明储能配置方案有效提升了资源利用效率，降低了整体供电成本，使得园区的电力供应更加经济高效。

第三小问：

主要是对联合运营和独立运营的结果进行比较。联合运营的不同之处在于园区范围的扩大，这导致了总光伏和风电装机容量的变化。实际上，可以将联合运营视为一个新的园区 D。为了分析导致经济收益改变的主要因素，需要重点分析那些能够显著影响总成本变化的因素。这些因素包括总光伏和风电装

机容量的变化、购电量的减少、弃风弃光量的减少，以及储能配置方案的优化对总供电成本和单位电量平均供电成本的影响。通过这些方面的分析，可以更清楚地理解联合运营模式下经济收益变化的原因。

对比联合园区配置储能前后与独立园区总和的对比结果，对比结果如下表 7 所示。

Table 7. Summary table of the calculation results of each index before and after the configuration of energy storage in the joint park and the sum of the independent park

表 7. 联合园区配置储能前后与独立园区总和的各指标计算结果汇总表

	独立园区总和	配置储能前	配置储能后
购电量	10005.815	8266.270	8051.048
弃风弃光量	2976.720	1237.175	1248.510
总供电成本	17276.412	15536.868	15287.343
单位电量平均供电成本	0.738	0.664	0.654

将上表可视化，其中平均成本数值与其它数据量级差距过大，本文打算将其乘以 4000 再画出柱状图。

从上表和我们后续实验中得到的图中我们可以分析得出，独立园区在购电量、弃电量和总成本等各项指标上都明显高于联合园区。这些数据表明，联合园区在电力采购、弃风弃光和整体供电成本方面都表现出更好的经济性。联合园区通过扩大园区范围和增加光伏、风电装机容量，显著降低了购电量和弃电量，同时优化了储能配置，从而减少了总供电成本。因此，可以很直观地看出，联合园区的经济效益远远优于独立园区。

我们可以由此得到，三个园区并不是在同一时间段购电或弃电。例如，园区 A 主要依赖光伏发电，发电集中在白天的 9~15 时段，因此在这个时间段会有弃电现象。而对于主要依赖风力发电的园区 B 来说，这段时间恰好是其购电需求的高峰期。如果能够将园区 A 在白天的富足电量供给园区 B，就可以减少园区 B 从主电站的购电量。园区 B 在清晨和深夜时段风力发电量较高，有富余电量，这些富余电量可以供给园区 A，满足其在这些时间段的电力需求。通过这种电力资源的互补供给，可以有效减少各园区从主电站的购电量，优化电力使用效率。由此我们可以确信，联合园区的电力富足和缺失状况均有所改善，因为各园区可以互相补充电力需求。由于不同园区的发电量和用电需求存在差异，这种互补仍不能完全避免电量富裕或缺失的情况。具体来说，园区 A 和园区 B 在不同时间段的发电量和需求量不同，即使通过互补供电可以减少部分购电量和弃电量，但因为光伏和风力发电的波动性和不确定性，仍然会出现某些时段电量过剩或不足的现象。因此，尽管联合运营提高了电力利用效率，优化了经济效益，但无法完全消除电力富余或缺失的问题。

4.3. 问题三

4.3.1. 各园区独立经营，联合经营风光储协调配置模型

问题三第一小问模型建立：

在没有明确的利润率数据的情况下，我们可以将风电和光伏电源的配置成本视为一种长期的成本摊销。具体来说，我们将初始投资成本分摊到设备的整个使用寿命期间，使得每年的成本更加均衡和可预测。为了简化问题，可以假设每年通过发电产生的电量来分摊这部分成本。这样，我们就能够将一次性的高额投资成本转换为每年的固定支出，从而便于进行经济性分析和成本管理。

每年需要分摊的配置成本可以表达为：

$$C_{wind_config_annual} = \frac{3000}{5} = 600 \text{ 元/kW/年}$$

$$C_{solar_config_annual} = \frac{2500}{5} = 500 \text{ 元/kW/年}$$

每年的配置成本应根据年发电量来分摊到每个时刻的发电成本中。假设一年有 24×365 个时刻，则时刻 t 的风电和光伏的配置成本分别为：

$$C_{wind_config_t} = \frac{600}{A_{wind,i} \cdot T_{year}}$$

$$C_{solar_config_t} = \frac{500}{A_{solar,i} \cdot T_{year}}$$

将配置成本添加到目标函数中，得到新的目标函数：

$$\min \sum_i \sum_t \left(C_{grid} \cdot P_{grid,i,t} + (C_{wind} + C_{wind_config_t}) \cdot P_{wind,i,t} + (C_{solar} + C_{solar_config_t}) \cdot P_{solar,i,t} \right) + \sum_i \sum_t \left(C_{batt_power} \cdot P_{batt_charge,i,t} + C_{batt_power} \cdot P_{batt_discharge,i,t} \right)$$

问题三第二小问模型建立：

第二小问实际上是对第一小问的参数进行了修改，这里的分时电价指的是可再生能源发电不足以供给本区域负荷，不足部分从主电网购电价格的变动，第二小问的模型与第一小问类似，只增加了一个关于网购电价格的分段函数：

$$C_{grid,t} = \begin{cases} 1 & 7 \leq t \leq 22 \\ 0.4 & \text{else} \end{cases}$$

4.3.2. 问题三求解与分析策略

第一小问：

利用粒子群优化算法求解可得：

- 1) 园区 A 电池功率：99.82，电池储能：387.34，新增光伏储能：68.76；
- 2) 园区 B 电池功率：32.25，电池储能：80.64，新增风电储能：0；
- 3) 园区 C 电池功率：99.32，电池储能：269.68，新增光伏储能：0，新增风电储能：407.75；
- 4) 联合园区电池功率：100，电池储能：249.99，新增光伏储能：31.81，新增风电储能：1000。

求解步骤：

预先估算每个园区年风电和光伏的总发电量

1) 从附件 3 中的数据，我们可以计算每个园区每年通过风电和光伏产生的总发电量。假设附件 3 提供了每个月的典型日风光发电功率数据(即每小时的发电功率)，通过累加这些典型日的数据，我们可以估算全年发电量。

2) 根据年发电量和年时刻数计算每个时刻的配置成本分摊。

3) 在原目标函数基础上加入配置成本分摊项。

原目标函数是为了最小化总成本，包括运行成本和投资成本。现在我们需要在目标函数中加入风电和光伏配置成本的分摊项。通过这种方法，我们可以将风电和光伏电源的配置成本合理地摊销到每年的运行成本中，从而进行更加全面的成本分析和优化。

运用 MATLAB 运行的结果如下图 4 所示。

最小化目标函数值： 2.7791e+04

Figure 4. The optimal solution for the coordinated allocation of wind, solar, and storage under independent operation

图 4. 独立运营下风光储协调配置最优解

第二小问：

利用粒子群优化算法求解结果得到如下表 8 所示。

Table 8. Summary table of the calculation results of each index under the coordinated allocation of wind and solar storage in each park and joint parks

表 8. 各个园区以及联合园区风光储协调配置下各指标计算结果汇总表

	园区 A	园区 B	园区 C	联合园区
购电量	6763.471185	6138.666668	5884.318435	8585.045737
弃风弃光量	485.5835969	0	317.3931199	1589.698344
总供电成本	5220.922866	5726.980002	4548.775317	19263.00025
单位电量平均供电成本	0.440528445	0.495199308	0.389984166	0.549108486

计算结果如下所示：

- 1) 园区 A 电池功率：99.9985，电池储能：475.7177，新增光伏储能：717.0494；
- 2) 园区 B 电池功率：0，电池储能：0，新增风电储能：0；
- 3) 园区 C 电池功率：100，电池储能：364.7745，新增光伏储能：252.5501，新增风电储能：0；
- 4) 联合园区电池功率：92.7313，电池储能：259.9225，新增光伏储能：590.0314，新增风电储能：

980.3。

运行的 MATLAB 程序上也只是改一部分参数，求解得到结果如下图 5 所示。

最小化目标函数值： 2.3474e+04

Figure 5. The optimal solution for the coordinated allocation of wind, solar, and storage independently operated in each park under Annex 3

图 5. 在附件 3 下各园区独立运营的风光储协调配置的最优解

5. 分析论证报告

园区未来的风光储协调配置方案经济性分析论证报告

1. 引言

本报告旨在对某园区的风电、光伏和储能系统的配置方案进行全面的经济性分析和论证。通过这一分析，我们的目标是通过优化配置方案，最小化园区的总成本，同时确保系统的经济性和可持续性。为此，我们利用了附件 3 中提供的全年风光发电功率数据，结合粒子群优化算法(PSO)来求解最佳的配置方案。在分析过程中，我们考虑了负荷增长的影响，假设负荷波动特性不变的情况下，三个园区的最大负

荷均增长 50%。此外，我们采用了风电和光伏电源每千瓦(kW)的配置成本分别为 3000 元和 2500 元，这包括了发电系统的所有必要设备的投资成本。为了评估项目的经济效益，我们设定了一个 5 年的投资回收期，作为收回全部投资(包括初始投资和运营成本)的时间框架。通过这些方法和假设，本报告致力于提供一个切实可行的、具有经济效益的风电、光伏和储能系统优化配置方案。

2. 数据与假设

2.1. 数据来源

附件 3 提供了全年 12 个月典型日的风光发电功率数据。这些数据用于估算年总发电量。

2.2. 主要假设

- 1) 风电和光伏电源的总配置成本分别为 100 万元和 150 万元。
- 2) 设备使用寿命为 20 年。
- 3) 分时电价如表 1 所示。
- 4) 每年总计 8760 小时(24 小时/天, 365 天/年)。

3. 年总发电量计算

利用附件 3 中的数据，我们估算了每个园区的年风电量和光伏总发电量。

4. 配置成本分摊

4.1. 每年的摊销成本:

$$C_{wind_config_annual} = \frac{3000}{5} = 600 \text{ 元/kW/年}$$

$$C_{solar_config_annual} = \frac{2500}{5} = 500 \text{ 元/kW/年}$$

4.2 每时刻 t 的摊销成本:

$$C_{wind_config_t} = \frac{600}{A_{wind,i} \cdot T_{year}}$$

$$C_{solar_config_t} = \frac{500}{A_{solar,i} \cdot T_{year}}$$

5. 新目标函数

在原目标函数基础上，加入配置成本分摊项:

$$\min \sum_i \sum_t (C_{grid} \cdot P_{grid,i,t} + (C_{wind} + C_{wind_config_t}) \cdot P_{wind,i,t} + (C_{solar} + C_{solar_config_t}) \cdot P_{solar,i,t})$$

$$+ \sum_i \sum_t (C_{batt_power} \cdot P_{batt_charge,i,t} + C_{batt_power} \cdot P_{batt_discharge,i,t})$$

6. 优化求解

采用粒子群优化算法(PSO)对上述目标函数进行优化求解。即在满足所有约束条件的情况下，找到风电、光伏和储能配置的最佳方案。

7. 经济性分析结果

通过优化求解，我们获得了风电、光伏和储能系统的最佳配置方案，并计算出了总成本。结果显示，考虑配置成本的分摊后，可以更全面地评估系统的经济性，同时确保满足电力需求并实现成本的最小化。具体的优化结果包括每个园区的最佳配置容量、每年的总成本以及单位电量的成本分摊情况。通过比较不同配置方案，我们能够确定最佳方案，使得园区在经济性和可持续性方面达到最佳平衡。

8. 结论

本报告详细分析了风电、光伏和储能系统的配置成本，通过将 these 成本进行长期摊销，并结合分时电价和全年发电量数据，建立了一个优化模型并求解出最优方案。研究表明，采用长期成本摊销的方法，能够有效简化成本分析过程，提供可靠的经济性评价依据。优化后的配置方案不仅能够满足电力需求，还实现了成本最小化，从而大幅提高了系统的经济效益和可持续性。这一方法通过将初始投资成本均摊到设备的使用寿命期内，结合实际运营成本，使得成本评估更加全面和实际，有助于做出更明智的决策，确保系统在长远运行中的经济性和可持续发展。

9. 建议

9.1. 持续监测和评估

为了确保配置方案的有效性和经济性，建议建立一套完善的监测和评估机制。定期收集和分析系统运行数据，包括风电、光伏发电量、储能系统的充放电情况、负荷变化情况等。通过对这些数据的分析，可以及时发现潜在的问题和优化空间。建议每季度进行一次全面评估，根据评估结果对配置方案进行必要的调整，以确保系统持续高效运行。同时，建立预警机制，及时响应异常情况，保证系统的稳定性和可靠性。

9.2. 政策支持

为了进一步降低项目成本，提高经济效益，建议积极争取相关政策支持。可再生能源补贴和税收优惠是降低项目初始投资和运营成本的重要手段。建议项目方与政府相关部门建立良好的沟通渠道，及时了解和申请适用的补贴政策和税收优惠。此外，还可以参与政府和行业组织的试点项目和示范工程，获取额外的支持和资源。定期跟踪政策变化，确保项目能够充分利用现有政策红利，最大化经济效益。

9.3. 技术创新

保持技术领先是提高系统效率和经济性的关键[3]。建议持续关注和采用最新的风电、光伏和储能技术，优化系统设计和设备选型。通过以上措施，风电、光伏和储能系统能够不断优化和提升，确保项目在经济性和可持续性方面始终保持领先地位。这些建议不仅能帮助实现当前的经济目标，还能为未来的技术升级和扩展打下坚实基础。

参考文献

- [1] 徐阳旭, 彭学林, 张梦. 考虑柔性负荷的风光储微电网多时间尺度优化调度[J]. 电工材料, 2023(4): 67-70+76.
- [2] 尹羽, 卢骚, 周恩珍. 基于改进粒子群算法的电网混合储能控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 39-42+74.
- [3] 周成伟. 基于风光储微电网下的储能容量优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.