

新能源光伏场站储能系统配置规划研究

张 恒¹, 王利锋²

(1. 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司, 四川 成都 610000;

2. 中国华电集团有限公司宁夏分公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 基于光伏电站的储能配置规划问题开展研究, 首先建立了储能充放电寿命和新能源运行成本模型, 其次提出了考虑储能系统全寿命周期约束和实际运行条件约束, 以经济性目标为基础采用粒子群算法实现多目标优化计算, 最后结合实际算例开展仿真计算与分析, 验证了所提出方法能够实现光伏+储能电站的经济化运行并提高对光伏资源的利用率。

关键词: 光伏电站; 储能; 粒子群算法; 多目标优先

Research on configuration planning of energy storage system for new energy photovoltaic stations

ZHANG Heng¹, WANG Lifeng²

(1. Information Industry Electronics 11th design and Research Institute Science and Technology Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. Ningxia branch of China Huadian Corporation Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: Based on the energy storage configuration planning of photovoltaic power stations, this paper first establishes the energy storage charging and discharging life and new energy operating cost models, then proposes to consider the life cycle constraints of the energy storage system and the constraints of actual operating conditions, and adopts particle swarm optimization algorithm to achieve multi-objective optimization calculation based on economic objectives. Finally, simulation calculation and analysis are carried out with practical examples. It is verified that the proposed method can realize the economical operation of photovoltaic + energy storage power station and improve the utilization rate of photovoltaic resources.

Key words: photovoltaic power station; energy storage; particle swarm optimization; multi-objective optimization

0 引言

储能作为优质的双向灵活调控能源, 能够为电网运行提供调峰、调频、备用及需求响应支撑等多种服务, 有效地提升传统电力系统的灵活性、经济性和安全性, 提高风、光等可再生能源消纳水平, 是推动可再生能源发展的关键技术之一^[1-3]。新能源场站与储能联合运行需要解决储能容量的配比问题, 确定其配置的目的及预期达

到的效果。在当前的发展阶段, 电池的储能系统价格都比较高昂。目前有大量学者对储能系统的储能配置的经济性进行了充分的研究, 确保储能系统的经济性及可行性, 保证储能系统能够促进新能源的发展, 同时提高电网对新能源的利用率^[4]。

在当前阶段的研究中, 部分文献指出将储能系统作为调节装置, 可以与常规的机组联合,

具有调峰的功能。根据目前电网的需求,当储能系统的装机容量足够大时,储能系统可以独立为电网提供辅助服务。文献[5]在分时定价机制的基础上,提出一种峰值能量释放和低谷能量存储的方法,通过动态调节电网侧功率和热负荷功率来确定储能装置的容量和功率。文献[6]首先预测风电功率,同时利用差值描述的方式对储能系统的容量配置进行约束。文献[7]对系统中风-光-火-储相互配合的出力策略进行完善,进而降低系统中的负荷波动值,通过高价时售出低价时购入的策略增加系统整体的收益。文献[8-10]在电网经济性运行的场景下进行研究,对电网侧的位置和储能系统的优化配置进行合理选择。其中,文献[8]建立了容量配置优化模型,使储能系统充放电控制策略达到最优,最后得到经济型和消纳风电效果都较好的储能系统容量配置方案。文献[9]建立了涉及储能系统配置的双层优化模型;其分为内层和外层,内层模型设置的目标函数是风储联合发电收益的最大值,外层模型的目标函数是整个系统的运行成本,进而寻找最优的配置节点和容量;双层优化模型内层和外层同时进行优化,得到最合理的调度策略。文献[10]采用叠加出力原理对储能系统进行配置,达到促进风电场出力的消纳量和平滑风电场出力曲线效果。

本文全面综合地考虑储能系统全寿命周期约束和实际运行条件约束,建立储能充放电寿命和新能源运行成本模型,保证配置储能的经济性。采用粒子群多目标优化算法,以经济性目标为基础,进行储能的容量优化配置,优化储能系统的出力功率。最后进行算例分析,根据新疆某光伏电站具体的场景和需求,以降低光伏电站弃光率为优化目标,为光伏电站优化配置储能系统。将四个季节典型日的实际运行数据代入到新能源场站储能系统配置规划模型中,全面综合考虑实际运行约束和储能系统,对储能系统的容量和功率的配置进行优化。采用成本效益分析法对储能配置项目进行经济性评估,分析项目全寿命周期的成本和收益情况。

1 优化规划模型建立

1.1 光伏出力模型建立

光伏出力在不同季节的表现有所不同,这与其所受的光照强度有关。光照强度遵循 β 分布,这是一种统计分布。为了更好地模拟光伏出力的季节性,基于历史的光照强度数据,采用极大似然法构建模型。这个模型可以帮助确定光强的 β 分布参数,进一步揭示光伏的典型时序特性。其概率密度函数可以表示为

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (1)$$

光伏发电的发电量受到光照强度 x 和光伏阵列面积的影响。在某一时刻 t ,光伏阵列的输出功率 $P_{PV}(h)$ 可表示为

$$P_{PV}(h) = \begin{cases} \frac{\eta_c}{K_c} Ax^2(t) & 0 < x(t) < K_c \\ \eta_c Ax(t) & x(t) > K_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, η_c 为阈值常数; A 为光伏阵列的面积; $Ax(t)$ 为光电转换效率。

$x(h)$ 等于一个由太阳辐射角确定的基础强度叠加一个随机光照强度衰减量 $\Delta x(h)$,可表示为

$$x(h) = x_0(h) + \Delta x(h) \quad (3)$$

光伏出力约束应满足实际出力不大于预测出力,即

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV} \quad (t=1, \dots, T) \quad (4)$$

式中, P_{PV} 为预测发电功率, $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻实际发电功率。

1.2 储能系统经济运行模型建立

要计算储能系统的成本,需要考虑四个模块。

1) 投资成本。储能系统的建设成本 $C_{ess,invest}$ 。

2) 维护成本。储能系统建成后运营维护的成本 C_r 。

3) 容量成本。储能元件在充电、放电中产生的不可避免的消耗。

4) 功率成本。包括电池能量管理系统、功

率转换系统以及监控设备的费用。

$$C_{\text{ess}} = C_{\text{ess,invest}} + C_r \quad (5)$$

式中, C_{ess} 为储能运行成本; $C_{\text{ess,invest}}$ 和 C_r 分别为储能系统前期建设投资成本和长期正常工作期间的维护成本。

$$C_{\text{ess,invest}} = C_{\text{ess,P}} P_{\text{ess}} + C_{\text{ess,E}} E_{\text{ess}} \quad (6)$$

式中, $C_{\text{ess,P}}$ 为储能系统的额定功率; P_{ess} 为储能系统的额定容量; $C_{\text{ess,E}}$ 为单位功率成本; E_{ess} 为单位容量成本。

对于一个运行周期内的储能系统, 储能设备的投资成本及运行维护费用均要作为储能系统的投资成本。

$$C_r = C_{\text{ess,r}} E_{\text{ess}} N_T \quad (7)$$

式中, $C_{\text{ess,r}}$ 和 N_T 分别为储能系统的运行维护成本和充放电次数。

本文综合考虑了储能系统整个运行周期的投资成本, 在将来实际的计算中将整个运行周期的运行成本折算成与实际出力有关的系数, 储能成本的计算公式为

$$C_{\text{cyclelife}} = \lambda_{\text{bess}} S_{\text{bess}} \delta_{\text{SOC}} n_{\text{bess}} \quad (8)$$

式中, λ_{bess} 为每度电的用电成本, 单位为元/(kW·h); n_{bess} 为储能系统的循环次数; $S_{\text{bess}} \delta_{\text{SOC}}$ 表示每次储能系统的充电或者放电的电量。

对储能系统的充电、放电状态进行描述, 有助于更好地分析储能系统的特性。对于储能系统运行周期内的剩余容量以及每个时刻充放电的功率, 这两个部分的描述最重要。

储能系统SOC的计算公式为

$$\text{SOC}(t) = \begin{cases} \text{SOC}(t-1) + \frac{P_{\text{bess}}(t) \eta_{\text{bc}} \Delta t}{E_{\text{bess}}} & P_{\text{bess}}(t) > 0 \\ \text{SOC}(t-1) + \frac{P_{\text{bess}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{bd}} E_{\text{bess}}} & P_{\text{bess}}(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{bess}}(t)$ 为电网在 t 时刻对储能系统的充电和放电功率。当 $P_{\text{bess}}(t) > 0$ 时, 储能系统处于充电状态, 此时电池储能系统视为电网的负荷; 而 $P_{\text{bess}}(t) < 0$ 时, 储能系统处于放电状态, 此时电池储能系统视为电网的电源。 E_{bess} 为电池储能系统在上一个时间点剩下的容量; $\text{SOC}(t)$ 为电池储

能系统在 t 时刻的荷电状况; Δt 为电量累积之间的时间差; η_{bc} 和 η_{bd} 分别为储能系统在充电和放电方面的效率。

(1) 储能系统功率约束

鉴于储能系统在充放电时是动态变化的, 为了确保系统在任一特定时刻 t 的安全运行, 不仅需要 Δt 时间段内限制充放电功率以符合额定功率的要求, 还必须对系统整体的荷电状态加以控制。

$$P_{\text{b,m}}(t) = \begin{cases} \min[E_{\text{bess}} S_{\text{SOCmax}} - E_{\text{bess}}(t-1), P_{\text{cap}}] & P_{\text{bess}}(t) > 0 \\ \max[E_{\text{bess}}(t-1) - E_{\text{bess}} S_{\text{SOC0}}, P_{\text{cap}}] & P_{\text{bess}}(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, E_{bess} 为储能系统的额定容量; S_{SOC0} 、 S_{SOCmax} 为储能系统荷电状态的初值和上限; P_{cap} 为储能系统的额定充放电的功率。

(2) 储能容量约束

储能系统的额定容量能有效地约束其荷电状态, 避免因过度充电或过度放电给储能元件带来的伤害。因此, 处于 t 时刻的储能系统必须满足储能设备的容量约束条件, 可表示为

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^t P_{\text{bess}}(t) \eta_{\text{bc}} \leq E_{\text{bess}} (S_{\text{SOCmax}} - S_{\text{SOC0}}) & P_{\text{bess}}(t) > 0 \\ \sum_{n=1}^t \frac{P_{\text{bess}}(t)}{\eta_{\text{bd}}} \leq E_{\text{bess}} (S_{\text{SOCmax}} - S_{\text{SOC0}}) & P_{\text{bess}}(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

(3) 储能系统荷电状态约束

$$S_{\text{SOCmin}} \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq S_{\text{SOCmax}} \quad (12)$$

式中, S_{SOCmin} 为储能系统荷电状态的最小值; S_{SOCmax} 为储能系统荷电状态的最大值。

1.3 储能系统优化配置规划机理

本文以光伏电站为例配置储能系统, 光伏电站储能系统配置主要实现平抑功率波动的功能, 辅助实现新能源消纳。

1.3.1 优化目标

确定将光储电站运行周期的净收益最大作为优化目标, 从售电收益、储能运行的损耗成本和考核成本三个方面构建优化模型。

$$\max I_{\text{np}} = I_{\text{grid}} - \text{TC}_{\text{bat}} - M_{\text{pun}} \quad (13)$$

式中, I_{grid} 为售电收益; TC_{bat} 为储能运行损耗成

本； M_{pun} 为惩罚成本（电量考核成本）； I_{np} 为净收益。

(1) 售电收益

光储电站的收益主要通过售电实现，通过对电价数据的输入来设置电价模型。

$$\sum_{n=1}^N P_{sw}(n) P_{pri}(n) \Delta n \quad (14)$$

式中， $P_{sw}(n)$ 为 n 时刻上网功率； $P_{pri}(n)$ 为 n 时刻上网电价。

(2) 电池损耗成本 TC_{bat}

从电化学的视角看，电池充放电次数的增加，会导致其中电解质分解、电极氧化等，进而使电池的容量逐渐下降，这种下降是不可逆的。当储能电池的可用容量下降到某一特定水平时，可以考虑将其报废，此时电池经历的充放电循环次数称为电池的循环使用寿命。

储能电池的使用寿命受到温度、放电深度等多种因素的影响。本文将放电深度 D_{bess} 作为影响电池使用寿命的主要影响因素，并结合实际的运行情况，提出了一个计算电池放电损耗成本的方法。

电池损耗成本 TC_{bat} 可以表示为

$$TC_{bat} = \sum_{n=1}^N P_B(n) C_{bat} \quad (15)$$

$$C_{bat} = \lambda \% \alpha E_{bat} \quad (16)$$

式中， $P_B(n)$ 为储能动作功率； $\lambda\%$ 为放电深度； C_{bat} 为单位功率运行损耗； α 为储能单位容量价格。

(3) 考核成本

储能系统受到其容量和传输功率的限制，功率需要在相应的计划范围内。若光储联合发电的输出功率偏离计划值，电网运营方会对光储联合发电实际输出功率与计划输出功率之间的差异进行考核。如果实际输出功率高于调度计划，多余的部分将通过有功功率控制设备进行调节；如果实际输出功率低于计划值，则需要承担相应的处罚。

$$\sum_{n=1}^N P_{pun}(n) F_{pri}(n) \quad (17)$$

式中， $P_{pun}(n)$ 为调度时段内缺额功率； $F_{pri}(n)$ 为电量考核成本。

1.3.2 约束条件

(1) 功率约束

根据功率平衡的条件，任意时刻的并网功率等于光储联合出力。

$$PV(n) + P_B(n) = P_{sw}(n) \quad (18)$$

式中， $PV(n)$ 为 n 时刻光伏功率； $P_B(n)$ 为 n 时刻储能功率； $P_{sw}(n)$ 为 n 时刻光储系统并网功率。

(2) 储能约束

储能充放电功率受变流器最大转换功率的限制，即

$$-P_{min} \leq P_B \leq P_{max} \quad (19)$$

式中， P_{max} 为储能变流器最大转换功率； P_B 为储能动作功率，储能系统充电为正值，放电为负值。

(3) 储能荷电率约束

$$S_{SOC0} \leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOCmax} \quad (20)$$

$$SOC(n) = \begin{cases} SOC(n-1) + \frac{P_B(n) \eta_{bc} \Delta n}{E_{bat}} & P_{bat}(t) > 0 \\ SOC(n-1) + \frac{P_B(n) \Delta n}{\eta_{bd} E_{bat}} & P_{bat}(t) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中， $SOC(n)$ 为储能系统第 n 时刻的荷电状态； η_{bc} 为储能系统的充电效率； η_{bd} 为储能系统的放电效率。

(4) 储能容量约束

$$E_{st_min} \leq E_{bat} \leq E_{st_max} \quad (22)$$

式中， E_{st_min} 、 E_{st_max} 为储能电池最小、最大配置容量。

2 多目标粒子群优化算法

在单目标粒子群优化的情况下，只有一个目标，任何两解都可以依据单一目标比较其好坏，可以得出没有争议的最优解。多目标优化与传统的单目标优化相对。多目标优化的概念是在某个情景中在需要达到多个目标时，由于容易存在目标间的内在冲突，一个目标的优化是以其他目标劣化为代价，因此很难出现唯一最优解，取而代之的是在它们中间做出协调和折中处理，使总体

的目标尽可能地达到最优。多目标粒子群优化算法的粒子位置的更新方式以及速度变化的方式一般表示为

$$\begin{cases} V_{(i+1)d} = \omega V_{id} + c_1 r_1 (P_{id} - X_{id}) + c_2 r_2 (P_{gd} - X_{id}) \\ X_{(i+1)d} = X_{id} + V_{id} \end{cases} \quad (23)$$

式中, V_{id} 、 $V_{(i+1)d}$ 表示更新前后的粒子速度变化; X_{id} 、 $X_{(i+1)d}$ 表示更新前后的粒子位置变化; d 、 ω 分别代表决策变量个数和惯性权重系数; c_1 和 c_2 是加速常数, 又称为学习因子; r_1 和 r_2 是一个 $[0,1]$ 内的随机数; P_{id} 表示单个粒子的最优位置; P_{gd} 表示种群中所有粒子的最优位置。

下面通过矩阵的方式更好地表示更新前后粒子的位置以及它们与适应度之间的关系。

$$P = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \cdots & X_{1N} & X_{1(N+1)} & \cdots & X_{1(M+N+V)} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \cdots & X_{2N} & X_{2(N+1)} & \cdots & X_{2(M+N+V)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{M1} & X_{M1} & X_{M3} & \cdots & X_{MN} & X_{M(N+1)} & \cdots & X_{M(N+V)} \end{pmatrix}_{M(N+V)} \quad (24)$$

式中, M 、 N 、 V 分别代表种群个数、优化模型中的决策变量个数和目标函数的个数。

对于此多目标优化问题有两类方法: 第一类方法是将多目标优化问题化简为单目标优化问题, 主要通过将不同的目标函数加权, 并将其组合在一个目标函数中完成, 其主要思想就是转化为单目标优化问题; 第二类方法就是本文主要利用的帕累托 (Pareto) 最优, 其主要思想是首先对不同目标优先级或权重进行明确, 然后试图找到优化条件在不同权重下各最优解的一组解 (成为Pareto解集), 然后根据决策者的偏好或应用场景决定选择哪个解。

所有Pareto最优解组成的集合称为Pareto解集, 本文在得到Pareto最优解集后, 利用信息熵决策法决策出最后的优化方案, 然后将Pareto解集中的非劣解挑选出来存在档案中, 这样每个方案中的 n 个目标函数也就是档案中所拥有的 n 种不同属性。

得到最优解集下一步需要利用信息熵决策法, 其具体步骤为:

1) 从Pareto解集中选取 N 组较为合适的非支配解存放在档案中, 档案中每个解有 n 个目标函数, 称为 n 种属性, 对 n 个不同属性进行无量纲处理, 即

$$f'_{ij} = \frac{f_{ij} - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad (i=1,2,\cdots,N; j=1,2,\cdots,n) \quad (25)$$

式中, i 为档案中存储的第 i 个解, 一个解集称为一个方案; $f_i(x_i)$ 为第 i 个方案中对应的第 j 个适应度值。

解集中方案 i 、适应度值 f_{ij} 在该方案中的贡献度 M_{ij} 为

$$M_{ij} = \frac{f'_{ij}}{\sum_{i=1}^N f'_{ij}} \quad (i=1,2,\cdots,N; j=1,2,\cdots,n) \quad (26)$$

2) 根据信息熵的计算公式, 计算 n 个目标函数的信息熵值为

$$\varepsilon_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N M_{ij} \ln M_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,N; j=1,2,\cdots,n) \quad (27)$$

3) 通过信息熵计算各指标的权重

$$\omega_j = \frac{1 - \varepsilon_j}{\sum_{j=1}^N (1 - \varepsilon_j)} \quad (j=1,2,\cdots,n) \quad (28)$$

4) 确定 n 个目标函数所占权重

$$F_{\min} = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \cdots + \omega_n f_n \quad (29)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \cdots + \omega_n = 1 \quad (30)$$

根据典型日发电数据求解出一年的售电利润, 售电利润等于售电收益减去售电成本。假设之后每一年的运行情况都相同, 以此作为每年的利润。

再根据配置的储能容量计算储能系统和BMS配置的初始投资, 根据储能功率计算PCS配置的初始投资, 以所有初始投资作为固定成本。

以充放电损耗成本、惩罚成本和利息作为可变成本。计算储能投资回报年限, 并通过项目寿命周期, 计算出在整个项目周期内光储系统产生的总收益。

根据储能寿命衰减函数来考量储能系统的寿命, 计算储能系统更换时间, 并根据更换时间计

算出一年储能系统更换产生的次数。设置储能系统残值价格，计算退役电池产生的收益。

对 $PQ(n)$ 求和，计算弃光量指标。查看配置

储能系统之后弃光减少情况。储能系统优化配置流程如图1所示。

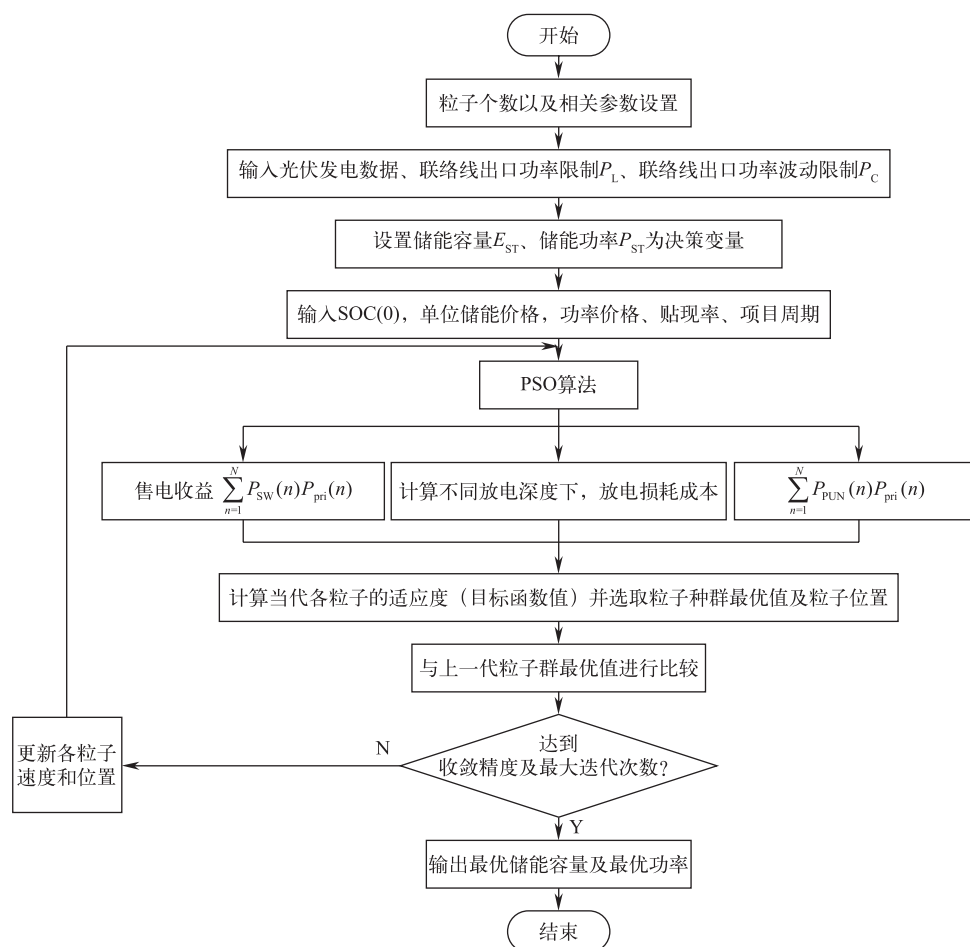


图1 储能优化配置流程

Fig. 1 Energy storage optimization configuration flow chart

具体步骤如下：

- 1) 设置运行参数。设置种群数量、迭代次数、粒子取值范围等，构建多目标粒子群算法的基础。
- 2) 载入新能源出力参数、联络线出口功率限制以及功率波动限制。
- 3) 初始化或更新种群个体。将储能系统容量、功率定义为模型中的决策变量，即将上述变量视为粒子群最优算法中粒子群的位置。
- 4) 输入储能系统参数和经济性参数。
- 5) 将各参数代入粒子群算法进行优化计

算，求解出售电收益、储能损耗成本和惩罚成本三项指标，并计算出净收益。

- 6) 本次循环最优值的选取。比较种群中的粒子，选取种群中的最优粒子并记录。
- 7) 选出个体最优 P_{best} 、全局最优粒子 P_{gest} 。
- 8) 迭代次数+1，在未达到最大迭代次数的情况下继续更新。
- 9) 更新各粒子的速度和位置，即更新储能系统的接入节点位置以及储能容量。重复循环步骤5)～步骤8)。
- 10) 最终解即为储能系统配置的最优方案。

优化算法针对储能的实际应用场景设计了储能优化配置功能，包括增加新能源消纳能力，降低新能源出力波动。以上流程具体介绍了粒子群优化算法的运算过程，包括数据的输入、处理和优化结果的输出。通过设置储能系统的容量与功率作为决策变量，以计算周期内收益最大为目标函数进行优化求解。

3 算例与结果分析

根据新疆某光伏电站具体的场景和需求，以降低光伏电站弃光率为优化目标，为光伏电站优化配置储能系统。将四个季节典型日的实际运行数据代入到本文模型中，综合考虑实际运行约束和储能系统容量、功率的约束，优化配置储能系统的容量和功率。采用成本效益分析法对储能配置项目进行经济性评估，分析项目全寿命周期的成本和收益情况。

3.1 仿真算例参数

(1) 经济性参数

经济性参数见表1。

表 1 经济性参数
Tab. 1 Economic parameters

投资方式	项目周期 / 年	贴现率 (%)	价格增长率 (%)	成本降低率 (%)
一次性投资	12	5.8	1.3	8

(2) 光伏发电系统参数

光伏发电系统参数见表2。

表 2 光伏发电系统参数
Tab. 2 Parameters of photovoltaic power generation system

主要参数	数值	主要参数	数值
光伏发电数据	新疆某电站 四季典型日 数据	其他成本 / (元 / kW)	20
额定容量 / MW	20	维护成本 / (元 / kW)	30
组件成本 / (元 / kW)	1 800	寿命 / 年	18
逆变器成本 / (元 / kW)	1 100	效率 (%)	90

(3) 储能系统参数

储能系统参数见表3。

表 3 储能系统参数

Tab. 3 Energy storage system parameters

主要参数	数值	主要参数	数值
电池成本/[元/(kW·h)]	2 000	自放电率 (%)	0.1
PCS成本/[元/(kW·h)]	20	充电效率 (%)	85
维护成本/[元/(kW·h)]	1 800	循环效率 (%)	90
初始 SOC (%)	20	循环放电次数	5 000
SOC 上限 (%)	20	SOC 下限 (%)	80

3.2 仿真结果分析

(1) 光伏电站优化配置储能仿真结果分析

算例仿真过程充分考虑光伏电站实际运行情况，运行参数见表4。经过优化计算后，得到储能优化配置方案及经济效益仿真结果见表5。通过本文提出的光伏场站储能系统配置规划方法，可以得到以光伏容量为20 000 kW的光伏电站，参与电力系统深度调峰300天为例，最优的储能规划配置容量为13 703 kW，储能规划功率为5 410 kW。整个储能系统的静态投资为2 950万元，按照总投资收益率4.6%、年弃光率0.01%计算，可得储能规划投资回收年限为6.3年，财务净现值可达1 020.59万元。通过本算例可知，文章所提出的考虑储能系统全寿命周期约束和实际运行条件约束，能够实现对光伏电站储能系统的优化配置，并实现对整个储能系统经济性运行的计算。

表 4 基本情况

Tab. 4 Basic Information

主要参数	数值	主要参数	数值
光伏总容量 / kW	20 000	项目运营年限 / 年	12
年慢充慢放天数 / 天	200	电池年衰减率 / 天	200
所得税率 (%)	25%	深度调峰天数 / 天	300
光伏上网电价 / (元 / kW)	0.92	保险费率 (%)	0.12%
深度调峰电价 / [元 / (kW·h)]	0.29	增发电量电价 / [元 / (kW·h)]	1

表 5 储能配置规划及经济效益仿真结果

Tab. 5 Energy storage configuration planning and economic benefit simulation results

主要参数	数值	主要参数	数值
储能规划容量 / kW	13 703	总投资收益率 (%)	4.6
静态投资 / 万元	2 950	财务净现值 / 万元	1 020.59
年弃光率 (%)	0.01	储能规划功率 / kW	5 410
投资回收年限 / 年	6.3	动态投资 / 万元	2 981

(2) 配置储能前后光伏电站功率运行结果分析

通过算例分析,得到光伏电站在配置储能前后的功率运行结果如图2~图9所示,分别为根据一年4个季节不配置储能和配置储能情况下,光

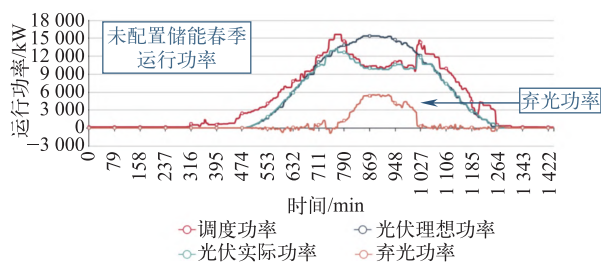


图2 未配置储能春季运行功率

Fig. 2 Spring operating power without energy storage configuration

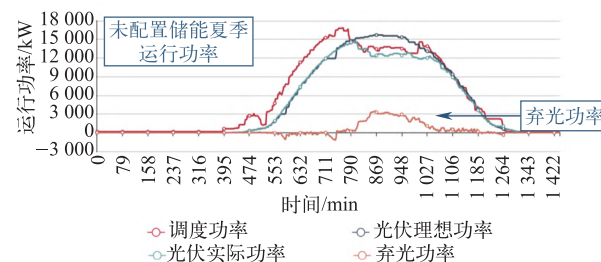


图4 未配置储能夏季运行功率

Fig. 4 Summer operating power without energy storage configuration

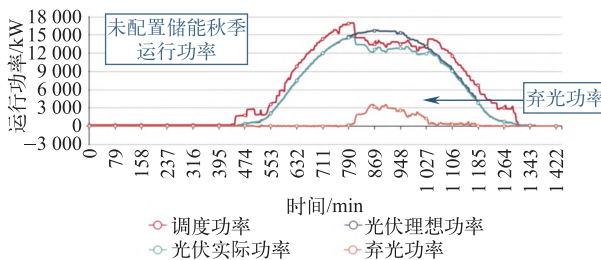


图6 未配置储能秋季运行功率

Fig. 6 Autumn operating power without energy storage configuration

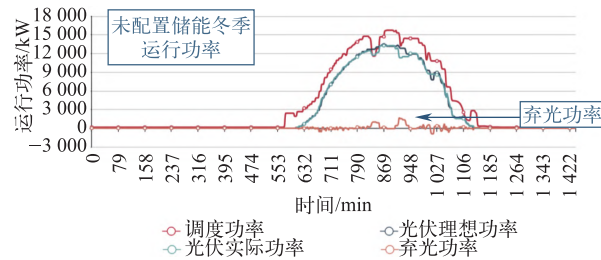


图8 未配置储能冬季运行功率

Fig. 8 Winter operating power without energy storage configuration

伏电站运行功率曲线与弃光率之间相关性仿真结果曲线图。

通过图2~图9仿真分析结果可知,在未配置储能时,仅仅依靠光伏本身,很难满足调度功率的要求。图2中,春季弃光尤为显著,造成大量

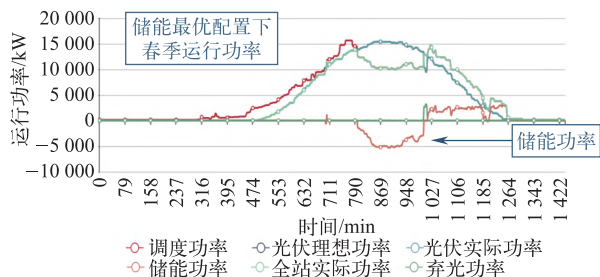


图3 储能最优配置下春季运行功率

Fig. 3 Spring operating power under optimal energy storage configuration

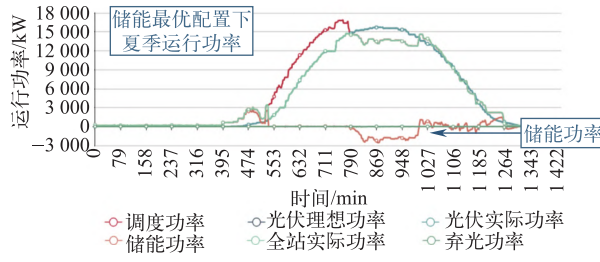


图5 储能最优配置下夏季运行功率

Fig. 5 Summer operating power under optimal energy storage configuration

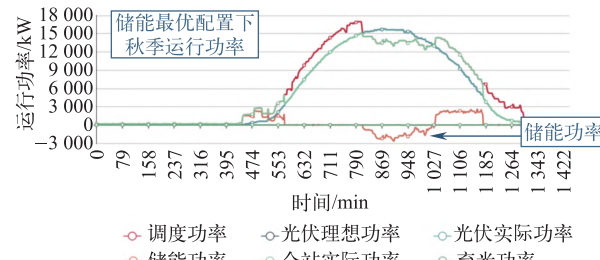


图7 储能最优配置下秋季运行功率

Fig. 7 Autumn operating power under optimal energy storage configuration

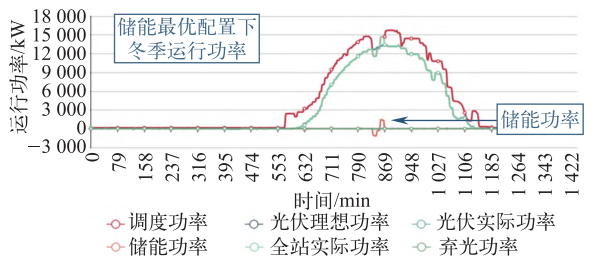


图9 储能最优配置下冬季运行功率

Fig. 9 Winter operating power under optimal energy storage configuration

光伏资源的浪费；图4与图6中，虽然夏季和秋季相较于春季弃光略少，但是也呈现较高的弃光现象。因此光伏电站在不配置储能的情况下，弃光现象较为突出，造成了大量的清洁能源浪费。

采用问题所提出的优化储能规划方法后，通过图3、图5、图7和图9可知，储能系统的加入能够显著降低各个季节的弃光率，实现对光伏能源的充分利用。在光伏出力高峰时，储能充电，吸收超出的功率；在光伏出力较低时，储能放电，提供功率支持。能很好地改善弃光现象，增加新能源消纳。

4 结束语

本文基于光伏电站的储能配置规划问题开展研究，旨在提出一种充分考虑储能系统全寿命周期约束和实际运行条件的储能规划方法，实现储能优化配置的情况下，减少新能源电站弃光现象，保证配置储能的经济性。通过研究得到以下结论：

1) 建立了储能充放电寿命和新能源运行成本模型，模型的建立充分考虑储能系统全寿命周期约束和实际运行条件约束。

2) 采用粒子群多目标优化算法，以经济性目标为基础，进行储能的容量优化配置，优化储能系统的出力功率。

3) 根据新疆某光伏电站具体的场景和需求进行算例分析，以降低光伏电站弃光率为优化目标，为光伏电站优化配置储能系统。

4) 通过算例分析，得到了优化配置储能系统的容量、不同季节配置储能后运行功率以及经济效益计算结果，证明采用本文所提出方法能够实现光伏+储能电站的经济化运行，提高对光伏资源的利用率。

参考文献

- [1] 高翔. 光伏电站用储能电池的发展现状及应用前景综述[J]. 太阳能, 2022 (9): 15-21.
- [2] 石凯. 基于混合储能的光伏电站有功功率快速响应研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [3] 林丽蓉. 储能技术在光伏电站并网发电系统中的应用[J]. 光源与照明, 2023 (9): 138-140.

- [4] 孙孝峰, 刘鑫磊, 滕甲训, 等. 基于光储混合配置的级联H桥型光伏逆变器功率平衡策略[J]. 中国电机工程学报, 2023(11): 1-15.
- [5] 平悦. 集中式光储电站建设项目投资效益综合评价研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- [6] 殷仁豪, 孙培峰, 卢海勇. 光伏电站和风电场储能容量配置的技术经济研究[J]. 上海节能, 2022 (2): 192-203.
- [7] 陈春启. 光伏储能电站的经济性探究[J]. 中国设备工程, 2021(3): 245-246.
- [8] 冯晓丽. 光伏储能电站的经济性分析[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(9): 52-58.
- [9] 茆美琴, 洪嘉玲, 张榴晨. 考虑光伏出力预测误差修正的储能优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42 (2): 410-416.
- [10] 金楚, 周博, 艾小猛, 等. 考虑光储联合系统参与频率响应的储能容量优化配置方法[J]. 全球能源互联网, 2018, 1 (3): 361-368.
- [11] 尹宏学. 适应新能源消纳的储能系统优化配置方法研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [12] 何宸. 大型光储电站容量优化配置及其经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [13] 徐岩, 何宸, 付超, 等. 多种调度模式下的光储电站经济性最优储能容量配置分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40 (6): 1632-1640.
- [14] 郑雪媛. 综合考虑规划和运行的电网侧储能优化配置研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [15] 曹敏健. 多运行场景下储能优化配置方法及实现策略[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [16] 陈骁. 计及混合储能系统能量分配策略的微网优化调度[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

作者简介

张恒 (1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为新能源光伏、储能、综合能源、多能互补。

王利锋 (1981—), 男, 工程师, 主要从事新能源企业综合管理。

(收稿日期: 2023-12-09)