

DOI:10.12158/j.2096-3203.2025.01.018

# 计及“高龄”光伏出力衰减的配电网储能经济优化配置

胡海鹏<sup>1,2</sup>, 赵平<sup>1,2</sup>, 李妍<sup>3</sup>, 侯青杏<sup>1,2</sup>, 汪光辉<sup>1,2</sup>, 李振兴<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;2. 三峡大学(电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室),湖北 宜昌 443002;  
3. 华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**随着分布式光伏“高龄”化趋势日益凸显,大规模未配置储能的“高龄”光伏并网存在电压波动、弃光等问题,可通过合理配置储能解决。为了提升储能配置的经济性,文中提出一种考虑“高龄”光伏出力衰减的配电网储能经济优化配置方法。分析“高龄”光伏发电衰减率和投运年限对实际光伏出力的影响,构建光伏出力与储能额定功率及容量的数学关系,基于此建立含储能建设运营成本、网损成本和峰谷套利收益的全生命周期成本最小,以及配电网节点电压偏移最小的储能优化配置模型。最后,采用粒子群算法在IEEE 33节点系统上进行求解。结果表明,采用该方法后,储能建设运营成本和全生命周期成本分别降低33.91%和6.01%,证明了文中方法的经济有效性。

**关键词:**储能配置;光伏出力衰减;储能全生命周期成本;“高龄”光伏;储能经济优化;粒子群算法

**中图分类号:**TM715

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2025)01-0175-08

## 0 引言

随着分布式光伏的爆发式增长以及运行年限的增加,光伏“高龄”化趋势日益凸显<sup>[1]</sup>。光伏输出存在不确定性,故高渗透率、未配置储能的“高龄”光伏并网存在电压波动、弃光等问题,可通过合理配置储能解决<sup>[2-4]</sup>。目前储能电池价格较高且使用寿命有限,导致电化学储能的投资建设成本较高<sup>[5-7]</sup>。“高龄”光伏出力的衰减直接影响储能功率和容量的配置,而储能的额定容量、额定功率和运行策略很大程度上决定了储能的经济成本<sup>[8-10]</sup>,因此亟须研究如何针对不同投运年限的“高龄”光伏合理配置储能,从而保证储能在经济性和技术性上配置最优<sup>[11-12]</sup>。

文献[13-14]均以储能投资成本最低为目标,对储能容量进行优化配置,降低了储能投资成本。文献[15]建立反映储能不平衡状态的衰减指标,优化储能的经济成本和使用寿命。文献[16]以储能最小总运行成本为经济性指标,提出一种考虑源荷不平衡的储能配置方法。以上研究从不同方面提升了储能配置的经济性,但仅从部分层面提升储能配置的经济性,未综合考虑储能的全生命周期成本。此外,储能优化配置应在保证经济性的同时,提升技术性指标。文献[17-18]提出储能多目标优化配置模型,目标函数包含配电网电压偏移、线损率以

及储能规划成本,对典型日新能源出力曲线进行储能优化配置,并采用智能算法进行求解。文献[19-20]在提升储能配置经济性的同时,利用储能稳定分布式电源电压波动和负荷波动。文献[21-22]以改善电网电压质量为目标进行储能配置。文献[23]考虑储能全生命周期收益和风光综合利用率,优化了储能配置容量和功率。以上研究综合考虑了储能配置的经济性和技术性,但关于光伏出力衰减对储能配置成本的影响研究相对较少,容易造成实际储能配置投资的浪费。

基于此,文中就储能在“高龄”光伏出力衰减背景下的经济优化配置开展研究。首先,分析“高龄”光伏出力衰减情况,得到不同投运年限的光伏出力衰减模型;其次,构建光伏出力与储能充放电功率及额定容量的数学关系,基于其对储能建设运营成本的影响,建立储能全生命周期成本最小、配电网节点电压偏移最小的储能优化配置模型;然后,采用粒子群算法求解,得到储能在配电网中的安装位置、额定容量和调度周期内的充放电功率;最后,对比分析不同储能配置场景下储能全生命周期成本指标和配电网节点电压偏移指标,验证了该方法在优化储能全生命周期成本方面的有效性和优越性。

## 1 计及光伏出力衰减的配电网储能优化模型

### 1.1 目标函数

为了提升储能配置的经济性,同时兼顾技术性,文中提出考虑光伏出力衰减的储能全生命周期

收稿日期:2024-05-23;修回日期:2024-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077120)

成本指标和配电网节点电压平均偏移度指标。

光伏组件年衰减率是指在温度 25 ℃、大气质量 AM1.5 和辐照度 1 000 W/m<sup>2</sup> 的标准测试条件下, 本年输出功率和前一年输出功率的差值与前一年输出功率的比值<sup>[24-25]</sup>。利用单位日照时数发电功率代替标准测试条件下的输出功率, 光伏发电效率平均衰减率可表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{sun}}^{\text{PV}} = \frac{W^{\text{PV}}}{t_{\text{sun}}} \\ \overline{\gamma}^{\text{PV}} = \frac{1}{y_{\text{PV}}} \sum_{y=1}^{y_{\text{PV}}} \frac{P_y^{\text{PV}} - P_{y+1}^{\text{PV}}}{P_y^{\text{PV}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{sun}}^{\text{PV}}$  为光伏电站某年的单位日照时数发电功率;  $W^{\text{PV}}$  为光伏电站的年发电量;  $t_{\text{sun}}$  为光伏电站所在区域的年日照时数;  $\overline{\gamma}^{\text{PV}}$  为光伏发电效率平均衰减率;  $y_{\text{PV}}$  为计算光伏发电衰减率的总年份;  $P_y^{\text{PV}}$ 、 $P_{y+1}^{\text{PV}}$  分别为第  $y$  年和第  $y+1$  年的单位日照时数发电功率。

对历史光伏出力运行场景进行聚类, 可将大量实际场景合并为具有代表性的典型场景, 得到光伏典型日出力曲线<sup>[26-27]</sup>。依据光伏典型日出力曲线数据和光伏发电效率平均衰减率, 得到考虑光伏衰减的光伏出力曲线。实际光伏出力可表示为:

$$P_t^{\text{PV}} = P_t^{\text{PV}*} (1 - \overline{\gamma}^{\text{PV}})^{N^{\text{ES}} + \frac{N^{\text{PV}}}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_t^{\text{PV}}$  为储能投运期间  $t$  时刻实际光伏发电功率;  $P_t^{\text{PV}*}$  为储能投运期间  $t$  时刻典型日的光伏发电功率;  $N^{\text{ES}}$  为储能从规划建设到投运的年数;  $N^{\text{PV}}$  为光伏已投运年数。

考虑储能经济效益最优和促进新能源消纳的作用, 储能额定功率应恰好满足电网侧的最大充电需求, 同时储能容量取决于其运行时间内累计最大充电电量<sup>[28]</sup>。由系统功率平衡可知, 当“高龄”光伏发电功率衰减时, 在其他功率假定保持不变的情况下, 实际储能充电功率和容量会相应减小, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{ES}} = P_t^{\text{DN}} + P_t^{\text{PV}} - P_t^{\text{loss}} - P_t^{\text{load}} \\ P_B^{\text{ES}} = \max\{|P_t^{\text{ES}}|\} \\ E_B^{\text{ES}} = \left| \int_0^t \beta P_t^{\text{ES}} dt \right| \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_t^{\text{ES}}$  为  $t$  时刻储能充电功率;  $P_t^{\text{DN}}$  为  $t$  时刻配电网电源功率;  $P_t^{\text{load}}$ 、 $P_t^{\text{loss}}$  分别为  $t$  时刻系统负荷功率和系统有功损耗功率;  $P_B^{\text{ES}}$ 、 $E_B^{\text{ES}}$  分别为考虑光伏出力衰减的储能额定功率、额定容量;  $\beta$  为储能充放电效率。

储能投资运营成本可以表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{inv}} = k_p P_B^{\text{ES}} + k_e E_B^{\text{ES}} \\ C_{\text{dep}} = k_{\text{dep}} C_{\text{inv}} \\ C_{\text{om}} = k_{\text{om},p} P_B^{\text{ES}} + k_{\text{om},e} E_B^{\text{ES}} \\ \eta_{\text{ES}} = \frac{\gamma(1 + \gamma)^{y_{\text{ES}}}}{(1 + \gamma)^{y_{\text{ES}}} - 1} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $C_{\text{inv}}$  为储能系统投资建设成本;  $k_p$ 、 $k_e$  分别为储能功率成本系数和容量成本系数;  $C_{\text{dep}}$  为储能容量衰减的设备折旧成本;  $k_{\text{dep}}$  为设备折旧成本系数;  $C_{\text{om}}$  为年运行维护成本;  $k_{\text{om},p}$ 、 $k_{\text{om},e}$  分别为储能单位功率年运维成本系数和单位容量年运维成本系数;  $\eta_{\text{ES}}$  为等额系列投资回收系数;  $\gamma$  为折现率;  $y_{\text{ES}}$  为储能系统的设计使用年限。

合理配置储能可以改善系统潮流分布、减小有功网损。单日有功网损成本为:

$$\begin{cases} P_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j \in M} (U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \delta_{ij,t}) G_{ij} \\ C_{\text{loss}} = k_{\text{loss}} P_{\text{loss}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{loss}}$  为日有功网损;  $M$  为所有节点集合;  $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  在  $t$  时刻的电压;  $\delta_{ij,t}$  为  $t$  时刻支路始末节点  $i$ 、 $j$  的相角差;  $G_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  间线路的电导;  $C_{\text{loss}}$  为日有功网损成本;  $k_{\text{loss}}$  为有功网损成本系数。

结合配电网峰谷分时电价, 储能可通过“低储高发”获得收益。单日储能峰谷套利收益为:

$$C_{\text{earn}} = \sum_{t=1}^{24} (k_{\text{sale}} P_{\text{sale}} t_{\text{sale}} - k_{\text{buy}} P_{\text{buy}} t_{\text{buy}}) \quad (6)$$

式中:  $C_{\text{earn}}$  为日储能峰谷套利收益;  $k_{\text{sale}}$ 、 $k_{\text{buy}}$  分别为储能放电、充电时段电价;  $P_{\text{sale}}$ 、 $P_{\text{buy}}$  分别为储能放电功率和充电功率;  $t_{\text{sale}}$ 、 $t_{\text{buy}}$  分别为储能放电时间和充电时间。

为了与储能运行周期相匹配, 将储能投资运营成本折算为日成本, 计及光伏出力衰减的储能全寿命周期规划成本  $f_1$  为:

$$f_1 = \frac{1}{365} [\eta_{\text{ES}} (C_{\text{inv}} + C_{\text{dep}}) + C_{\text{om}}] + C_{\text{loss}} - C_{\text{earn}} \quad (7)$$

大规模分布式光伏接入配电网会造成电压波动, 接入储能可改善电压波动, 采用配电网节点电压平均偏移度指标  $U_{\text{lev}}$  作为目标函数之一。

$$U_{\text{lev}} = \frac{1}{TN} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left( \frac{U_{i,t} - U_i^*}{\Delta U_{i,\text{max}}} \right)^2 \quad (8)$$

式中:  $T$  为计算周期时长;  $N$  为负荷节点数;  $U_i^*$  为节点  $i$  的额定电压;  $\Delta U_{i,\text{max}}$  为节点  $i$  的电压最大允许偏差值。

当节点电压处于正常范围时,惩罚函数值为 0;当节点电压越限时,惩罚函数值大小由惩罚因子  $k_v$  决定,通常取一个较大的正整数。

$$K(U_{i,t}) = \begin{cases} 0 & U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \\ k_v \left( \frac{U_{\min} - U_{i,t}}{U_{\max} - U_{\min}} \right)^2 & U_{i,t} < U_{\min} \\ k_v \left( \frac{U_{i,t} - U_{\max}}{U_{\max} - U_{\min}} \right)^2 & U_{i,t} > U_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

$$d_U = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N K(U_{i,t}) \quad (10)$$

式中:  $K(U_{i,t})$  为  $t$  时刻节点  $i$  的惩罚函数值;  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为节点电压上、下限;  $d_U$  为总的节点电压约束的惩罚函数值。表征节点电压偏移指标的目标函数  $f_2$  为:

$$f_2 = U_{\text{lev}} + d_U \quad (11)$$

考虑“高龄”光伏接入配电网导致电压波动和储能规划建设成本过高的问题,建立使储能全生命周期成本最小、配电网节点电压偏移最小的储能优化配置模型,兼顾经济性和技术性的储能配置优化函数  $F$  为:

$$\min F = \min(f_1, f_2) \quad (12)$$

## 1.2 约束条件

约束条件包括功率平衡约束、潮流约束以及储能功率、容量和荷电状态约束。

(1) 系统功率平衡约束。

$$P_{\text{DN}} + P_{\text{ES}} + P_{\text{DG}} = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{DN}}$  为配电网电源功率;  $P_{\text{ES}}$  为储能并网功率;  $P_{\text{DG}}$  为分布式电源功率;  $P_{\text{load}}$  为系统负荷功率。

(2) 系统潮流约束。

$$\begin{cases} P_j - \sum_{i=1}^N U_i (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) U_j = 0 \\ Q_j - \sum_{i=1}^N U_i (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) U_j = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_j$ 、 $Q_j$  分别为节点  $j$  发出的有功、无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  电压;  $B_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  间线路的电纳;  $\delta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间的相角差。

(3) 储能功率、容量和荷电状态约束。

$$\begin{cases} |P_{\text{B},\min}^{\text{ES}}| \leq |P_t^{\text{ES}}| \leq |P_{\text{B},\max}^{\text{ES}}| \\ E_{\text{B},\min}^{\text{ES}} \leq E_{\text{B}}^{\text{ES}} \leq E_{\text{B},\max}^{\text{ES}} \\ E_{\text{B}}^{\text{ES}} = \beta P_{\text{B}}^{\text{ES}} \\ 0.2 \leq S_t^{\text{SOC}} \leq 0.9 \\ S_{\text{start}}^{\text{SOC}} = S_{\text{end}}^{\text{SOC}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{\text{B},\max}^{\text{ES}}$ 、 $P_{\text{B},\min}^{\text{ES}}$  分别为储能额定功率的最大、最小值;  $E_{\text{B},\max}^{\text{ES}}$ 、 $E_{\text{B},\min}^{\text{ES}}$  分别为储能额定容量的最大、最

小值;  $S_t^{\text{SOC}}$  为  $t$  时刻储能荷电状态,设定其范围为 0.2~0.9,防止储能过度充放电影响使用寿命;  $S_{\text{start}}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{\text{end}}^{\text{SOC}}$  分别为调度周期始、末时刻储能荷电状态,使其相等能保证储能在下个周期的调度能力。

## 2 模型求解

多目标粒子群优化(multi-object particle swarm optimization, MOPSO)算法收敛速度快、参数设置简单,已被广泛用于多目标优化中<sup>[29-30]</sup>。MOPSO 算法的速度、位置和惯性权重更新策略分别如式(16)、式(17)和式(18)所示。

$$v_n(k+1) = w(k)v_n(k) + c_1 r_1 [x_{\text{pbest},n}(k) - x_n(k)] + c_2 r_2 [x_{\text{gbest}}(k) - x_n(k)] \quad (16)$$

$$x_n(k+1) = x_n(k) + v_n(k+1) \quad (17)$$

$$w(k) = w_{\max} - \frac{k(w_{\max} - w_{\min})}{k_{\max}} \quad (18)$$

式中:  $v_n(k)$  为粒子  $n$  在第  $k$  次迭代时的速度;  $x_n(k)$  为粒子  $n$  在第  $k$  次迭代时的位置;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为个体和全局学习因子,  $c_1 \in [0, 2]$ 、 $c_2 \in [0, 2]$ ;  $x_{\text{pbest},n}(k)$ 、 $x_{\text{gbest}}(k)$  分别为粒子  $n$  和所有粒子第  $k$  次迭代后的最佳位置;  $r_1$ 、 $r_2$  为从  $[0, 1]$  中随机选取的常数;  $w(k)$  为第  $k$  次迭代时的惯性权重,随迭代次数呈线性递减趋势;  $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  分别为惯性权重的上、下限;  $k_{\max}$  为迭代次数最大值。

利用 MOPSO 算法得到 Pareto 解集后,采用基于熵权的逼近理想解(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)法选择最优方案。首先对 Pareto 解集中各粒子的目标函数值进行归一化,然后计算粒子  $n$  在第  $m$  个目标函数上的增益度  $Q_{mn}$  和信息熵  $\varepsilon_m$ 。

$$\begin{cases} F_m(x_n) = \frac{f_m(x_n) - f_{m,\min}}{f_{m,\max} - f_{m,\min}} \\ Q_{mn} = \frac{F_m(x_n)}{\sum_{n=1}^{N_n} F_m(x_n)} \\ \varepsilon_m = -\frac{1}{\ln N_n} \sum_{n=1}^{N_p} Q_{mn} \ln Q_{mn} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $F_m(x_n)$  为归一化后粒子  $n$  的第  $m$  个目标函数值;  $f_m(x_n)$  为粒子  $n$  的第  $m$  个目标函数值;  $f_{m,\min}$ 、 $f_{m,\max}$  分别为第  $m$  个目标函数的最小值和最大值;  $N_n$  为粒子总数;  $N_p$  为种群最终 Pareto 解集大小。

根据信息熵计算各目标函数权重  $\Phi_m$ ,然后得到粒子  $n$  与最优、最劣方案的距离  $d_+(x_n)$ 、 $d_-(x_n)$ ,最终确定粒子  $n$  的综合距离  $d(x_n)$ ,其中  $d(x_n)$  越

大,该方案越接近最优方案,即方案的综合评分越高。

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_m &= \frac{1 - \varepsilon_m}{\sum_{m=1}^2 (1 - \varepsilon_m)} \\ d_{\pm}(x_n) &= \sqrt{\sum_{m=1}^2 (\Phi_m F_m(x_n) - \Phi_m F_{m\pm})^2} \\ d(x_n) &= \frac{d_-(x_n)}{d_+(x_n) + d_-(x_n)} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

式中: $F_{m+}$ 、 $F_{m-}$ 分别为第  $m$  个目标函数归一化后的最优值和最差值。

文中采用 MATLAB 语言编写的 MOPSO 算法对储能配置优化模型进行仿真。储能配置求解流程如图 1 所示。

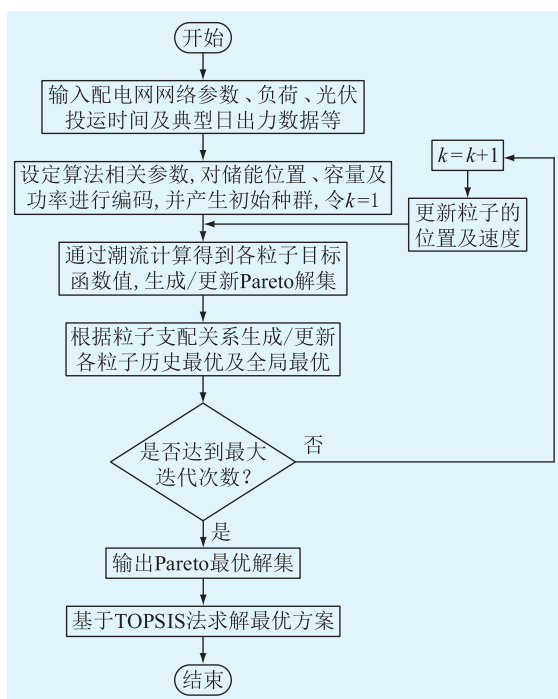


图 1 储能配置求解流程

Fig.1 Flow chart of energy storage configuration solution

决策变量为储能的位置、容量以及日充放电策略。首先,输入配电网各参数、“高龄”光伏投运时间以及典型日出力数据等,根据充放电功率约束和位置约束生成一个储能配置方案,方案包括储能的位置和一天内各时刻的充放电功率,进而得到储能的容量以及储能荷电状态曲线;其次,判断该方案是否满足其他约束,基于此对网络拓扑进行实时修改以及潮流计算更新,进一步利用 2 个目标函数值最小考核储能配置方案的优劣;然后,通过 MOPSO 算法对变量进行更新迭代,得到储能各控制变量的

Pareto 解集,运用基于熵权的 TOPSIS 法比较各方案与最优方案的接近程度;最后,确定储能最佳安装位置、额定容量以及日充放电策略。

### 3 算例分析

#### 3.1 “高龄”光伏出力衰减分析

文中光伏出力衰减数据选自江苏省某地区实际光伏电站,该光伏电站于 2012 年投运。由于该光伏电站在 2018 年进行了升级改造,因此选取 2012 年—2017 年的年发电量以及年日照小时数进行发电效率衰减分析,根据式(1)计算得到单位日照时数发电功率以及光伏发电效率衰减率,结果见表 1。

表 1 单位日照时数发电功率及衰减率

Table 1 Generation power and attenuation rate per unit sunshine hours

年份	单位日照时数发电功率/kW	衰减率/%
2012	26.9	
2013	26.8	0.37
2014	26.7	0.45
2015	26.5	0.49
2016	26.4	0.46
2017	26.2	0.44

由 2013 年—2017 年的光伏发电效率衰减率计算得出平均衰减率为 0.44%。

选取该光伏电站每天各时段的光伏出力等历史数据,聚类得到光伏典型日的出力曲线,结合光伏发电效率平均衰减率,根据式(2)计算得到考虑“高龄”光伏出力衰减的光伏典型日出力曲线。由历史数据聚类得到的光伏典型日出力曲线和已投运 20 a 的光伏出力曲线对比如图 2 所示。

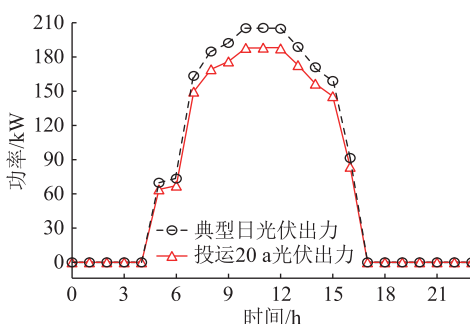


图 2 考虑衰减的光伏出力曲线

Fig.2 Photovoltaic output curves considering attenuation

#### 3.2 储能优化配置结果

文中在 IEEE 33 节点配电系统上进行算例仿真分析,潮流计算采用前推回代法。该配电系统总支路数为 32,额定电压、额定容量分别为 12.66 kV 和 10 MV·A,在节点 10、15 和 30 接入 200 kW 光伏,



1—33 节点均可配置储能。IEEE 33 节点配电系统如图 3 所示,其他参数设置见表 2。

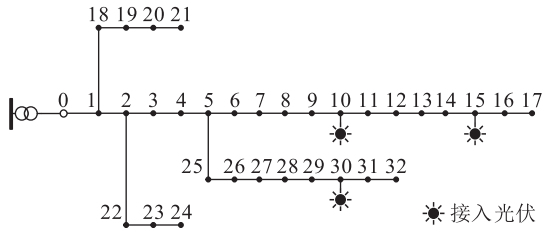


图 3 IEEE 33 节点配电系统

Fig.3 Power distribution system of IEEE 33-node

表 2 参数设置

Table 2 Parameters setting

参数	数值
储能功率成本系数/(元·kW <sup>-1</sup> )	1 000
储能容量成本系数/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	2 300
储能设备折旧成本系数/%	8
储能单位功率年运维成本系数/(元·kW <sup>-1</sup> )	50
储能单位容量年运维成本系数/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	10
折现率/%	10
储能充放电效率/%	90
储能系统的设计使用年限/a	15
储能从规划建设到投运的年数/a	2
最大迭代次数	100
初始种群个数	50
惯性权重范围	0.4~0.9
个体学习因子	1.49
全局学习因子	1.49

为验证所提储能配置模型的有效性,设置以下 6 个场景进行仿真分析。

场景 1:不配置储能,考虑“高龄”光伏出力衰减;

场景 2:配置储能,不考虑“高龄”光伏出力衰减,在 3 个光伏电站均为历史数据聚类的光伏出力场景下,进行储能优化配置;

场景 3:配置储能,考虑“高龄”光伏出力衰减,在 3 个光伏电站均已投运 10 a 的光伏出力场景下,进行储能优化配置;

场景 4:配置储能,考虑“高龄”光伏出力衰减,在 3 个光伏电站均已投运 15 a 的光伏出力场景下,进行储能优化配置;

场景 5:配置储能,考虑“高龄”光伏出力衰减,在 3 个光伏电站均已投运 20 a 的光伏出力场景下,进行储能优化配置;

场景 6:配置储能,考虑“高龄”光伏出力衰减,在 3 个光伏电站分别已投运 10、15、20 a 的光伏出

力场景下,进行储能优化配置。

文中运用基于熵权的 TOPSIS 法,选取 Pareto 解集中的最优方案进行比较分析,各场景储能规划结果见表 3,场景 1、2、4、6 的配电网 24 h 平均节点电压变化曲线如图 4 所示。

表 3 各场景储能规划结果

Table 3 Energy storage planning result for each scenario

场景	储能配置节点	储能容量/(MW·h)	总容量/(MW·h)	节点电压偏移指标/p.u.	全生命周期成本指标/元
1				17.419	
2	12	0.819 4	3.225 2	10.227	2 575.997
	17	1.843 3			
	28	0.562 5			
3	12	0.906 4	2.775 7	10.549	2 531.343
	16	1.317 9			
	28	0.551 4			
4	10	0.536 5	2.351 4	10.375	2 444.297
	16	1.107 1			
	30	0.707 8			
5	11	0.548 4	1.900 2	11.801	2 409.736
	15	0.810 4			
	30	0.541 4			
6	11	0.561 8	2.099 6	11.146	2 421.165
	16	0.977 2			
	28	0.560 6			

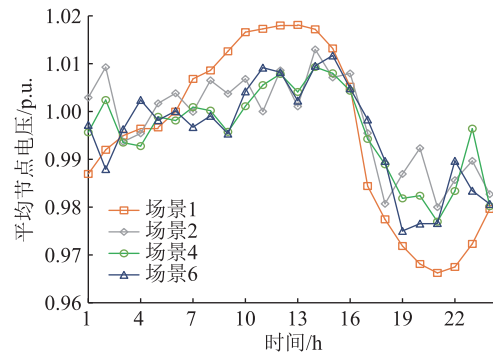


图 4 配电网 24 h 平均节点电压变化曲线

Fig.4 24 h average node voltage variation curves of distribution network

由表 3 中节点电压偏移指标结果可知,在含高比例“高龄”光伏配电网中,配置储能可以有效改善电压波动问题。场景 2—场景 6 为配置储能场景,分别使配电网的节点电压偏移指标降低了 41.29%、39.44%、40.44%、32.25% 和 36.01%。结合图 4 可知,随着储能全生命周期成本的降低,即储能配置容量的减小,系统节点电压偏移指标并未明显下降,因此在储能优化配置中考虑“高龄”光伏出力衰减,可以提升储能配置的经济性,同时改善技术性指标。

为进一步说明“高龄”光伏出力衰减对配置储

能经济性的影响,针对场景 2—场景 6 的储能全生命周期成本指标进行详细分析,各场景储能全生命周期的相关成本均折算为日成本,具体如表 4 所示。

表 4 各场景储能全生命周期成本  
Table 4 Full life cycle cost of energy storage in each scenario 单位:元

场景	建设运营成本			网损成本	峰谷套利	全生命周期成本
	建设成本	折旧成本	运维成本			
2	3 105.6	248.5	253.3	1 762.1	2 793.6	2 576.0
3	2 566.6	205.3	177.6	1 830.4	2 248.9	2 531.3
4	2 333.8	186.7	211.1	1 851.2	2 138.4	2 444.3
5	1 839.2	147.1	152.8	1 930.2	1 659.5	2 409.7
6	2 046.2	163.7	174.2	1 891.4	1 854.4	2 421.2

由表 4 可以看出,相较于未考虑光伏出力衰减的场景 2,场景 3—场景 5 的储能全生命周期成本随光伏出力衰减加剧而逐渐降低。随着光伏投运年限的增加,受“高龄”光伏出力衰减影响的储能建设运营成本逐渐降低,相比于场景 2,场景 3—场景 5 的整体建设运营成本分别降低 18.24%、24.28% 和 40.70%,其中运维成本分别降低 29.89%、16.66% 和 39.68%,储能建设成本和折旧成本均分别降低 17.4%、24.9% 和 40.8%。

相较于场景 2,场景 6 的储能整体建设运营成本和全生命周期成本分别降低 33.91% 和 6.01%,储能全生命周期年均成本减少 5.6 万元,进一步说明了计及“高龄”光伏出力衰减的配电网储能配置方案的经济性。因此,在储能配置中考虑“高龄”光伏发电效率衰减,可以减少储能配置的容量和功率,从而降低储能的建设运营成本和全生命周期成本。

#### 4 结论

为提高储能配置的经济性,文中提出一种考虑“高龄”光伏出力衰减的储能经济优化配置模型,以储能全生命周期成本最小和配电网电压偏移最小为目标函数,并采用 MOPSO 算法求解优化配置模型,结果表明:

(1) 在储能优化模型中考虑“高龄”光伏出力衰减,可以有效降低储能配置的额定容量和功率,从而有效降低储能建设运营成本。

(2) 根据“高龄”光伏出力衰减情况,适量降低储能容量和功率,虽然储能改善电压波动作用有所降低,但幅度很小。

(3) 文中所提储能优化模型得出的储能配置方案,可以适配不同投运年限的“高龄”光伏,在保证技术性指标的同时,可以有效降低储能配置的全生命周期成本。

后续研究将在储能经济优化配置中进一步考虑减碳效益、储能选型等问题,并将文中模型拓展到风能等可再生能源,以实现更全面的储能优化配置。

#### 参考文献:

[1] 陈伟,雷欢,裴婷婷,等. 基于退化轨迹和 Wiener 模型的光伏组件剩余寿命预测方法[J]. 太阳能学报,2023,44(7): 175-181.  
CHEN Wei, LEI Huan, PEI Tingting, et al. Remaining life prediction method of photovoltaic modules based on degradation trajectory and Wiener model[J]. Acta Energetica Sinica, 2023,44(7):175-181.

[2] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术,2022,41(2):67-74.  
YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022,41(2): 67-74.

[3] 黄海泉,黄晓巍,姜望,等. 新型配电网分布式储能系统方案及配置研究综述[J]. 南方能源建设,2024,11(4):42-53.  
HUANG Haiquan, HUANG Xiaowei, JIANG Wang, et al. A review of distributed energy storage system solutions and configurations for new distribution grids[J]. Southern Energy Construction, 2024,11(4):42-53.

[4] 赵瑞锋,郑文杰,余志文,等. 基于合作博弈的光伏产销者分布式储能容量优化配置[J]. 可再生能源,2023,41(10): 1391-1400.  
ZHAO Ruifeng, ZHENG Wenjie, YU Zhiwen, et al. Optimal allocation strategy of distributed energy storage capacity based on cooperative game[J]. Renewable Energy Resources, 2023,41(10):1391-1400.

[5] 刘阳,滕卫军,谷青发,等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J]. 储能科学与技术,2023,12(1):312-318.  
LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023,12(1):312-318.

[6] 修晓青,李相俊,王佳蕊,等. 基于等效能折算的储能电站广义成本研究[J]. 中国电力,2022,55(4):192-202.  
XIU Xiaqing, LI Xiangjun, WANG Jiarui, et al. Generalized cost study of energy storage power station based on equivalent efficiency conversion[J]. Electric Power, 2022,55(4):192-202.

[7] 索克兰,程林,许鹤麟,等. 提升电池储能系统经济性研究方法综述[J]. 全球能源互联网,2023,6(2):163-178.  
SUO Kelan, CHENG Lin, XU Helin, et al. A review of research methods for improving the economy of battery energy storage system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023,6(2):163-178.

[8] 李建林,修晓青,吕项羽,等. 储能系统容量优化配置及全寿

- 命周期经济性评估研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 1-13.
- LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LYU Xiangyu, et al. Review on capacity optimization configuration and life cycle economic evaluation method for energy storage system [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 1-13.
- [9] 元博, 张运洲, 鲁刚, 等. 电力系统中储能发展前景及应用关键问题研究[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 1-8.
- YUAN Bo, ZHANG Yunzhou, LU Gang, et al. Research on key issues of energy storage development and application in power systems [J]. Electric Power, 2019, 52(3): 1-8.
- [10] 刘凡, 李凤婷, 张高航, 等. 计及循环寿命和运营策略的风电汇集区域储能电站优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 127-139.
- LIU Fan, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Optimal configuration of storage power stations in a wind power gathering area considering cycle life and operation strategy [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 127-139.
- [11] YANG Y Q, BREMNER S, MENICTAS C, et al. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 109-125.
- [12] GU C J, WANG J X, YANG Q, et al. Assessing operational benefits of large-scale energy storage in power system: comprehensive framework, quantitative analysis, and decoupling method [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(7): 10191-10207.
- [13] 陈景文, 肖妍, 莫瑞瑞, 等. 考虑光伏校正的微电网储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 59-66.
- CHEN Jingwen, XIAO Yan, MO Ruirui, et al. Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 59-66.
- [14] 王依妍, 陈景文. 基于 ISSA 的光储微网混合储能容量优化配置[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 23-29, 53.
- WANG Yiyen, CHEN Jingwen. ISSA-based optimal configuration of optical storage microgrid hybrid energy storage capacity [J]. Smart Power, 2023, 51(4): 23-29, 53.
- [15] 张小莲, 陈冲, 张仰飞, 等. 考虑电池运行状态的风电场储能容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 199-207.
- ZHANG Xiaolian, CHEN Chong, ZHANG Yangfei, et al. Optimal configuration of wind farm energy storage capacity considering battery operation state [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 199-207.
- [16] ZHENG F F, MENG X F, XU T F, et al. Optimization method of energy storage configuration for distribution network with high proportion of photovoltaic based on source-load imbalance [J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10628.
- [17] 肖小龙, 史明明, 周琦, 等. 基于改进海洋捕食者算法的配电网储能多目标优化配置[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(8): 2565-2574.
- XIAO Xiaolong, SHI Mingming, ZHOU Qi, et al. Multi-objective optimization configuration of energy storage in distribution networks based on improved marine predator algorithm [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(8): 2565-2574.
- [18] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
- YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.
- [19] LI F, LI X S, ZHANG B Q, et al. Multiobjective optimization configuration of a prosumer's energy storage system based on an improved fast nondominated sorting genetic algorithm [J]. IEEE Access, 2021, 9: 27015-27025.
- [20] YAN N, ZHANG B, LI W, et al. Hybrid energy storage capacity allocation method for active distribution network considering demand side response [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 5700204.
- [21] 江友华, 刘弘毅, 叶尚兴, 等. 考虑电压质量及灵活性的高比例新能源配电网储能-无功优化配置[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 68-79.
- JIANG Youhua, LIU Hongyi, YE Shangxing, et al. Energy-storage and reactive-power optimization of a high-proportional new energy distribution network considering voltage quality and flexibility [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 68-79.
- [22] 李英量, 蔡鹤鸣, 王康, 等. 改善不平衡配电网电压质量的分分布式储能序次优化配置方法[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 87-95.
- LI Yingliang, CAI Heming, WANG Kang, et al. Sequence optimal configuration of distributed energy storage for improving voltage quality of unbalanced distribution network [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 87-95.
- [23] 梅书凡, 檀勤良, 代美. 考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 51-57.
- MEI Shufan, TAN Qinliang, DAI Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 51-57.
- [24] 于航, 张涵, 吴双应. 基于 LSTM 和多项式回归的光伏组件衰减检测方法 [J/OL]. 重庆大学学报: 1-18 [2023-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20231030.1815.002.html>.
- YU Hang, ZHANG Han, WU Shuangying. Research on solar panel decay analysis method based on LSTM and polynomial regression hybrid algorithm [J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-18 [2023-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20231030.1815.002.html>.

[25] 黄岳文,曹华翔,刘帅,等. 单晶硅光伏组件性能衰减分析[J]. 电源技术,2019,43(4):641-645.  
HUANG Yuewen, CAO Huaxiang, LIU Shuai, et al. Degradation analysis of monocrystalline silicon PV modules[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(4): 641-645.

[26] 白斌,韩明亮,林江,等. 含风电和光伏的可再生能源场景削减方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 141-149.  
BAI Bin, HAN Mingliang, LIN Jiang, et al. Scenario reduction method of renewable energy including wind power and photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 141-149.

[27] 吴家葆,曾国辉,张振华,等. 基于 K-means 分层聚类的 TCN-GRU 和 LSTM 动态组合光伏短期功率预测[J]. 可再生能源, 2023, 41(8): 1015-1022.  
WU Jiabao, ZENG Guohui, ZHANG Zhenhua, et al. Dynamic combination of TCN-GRU and LSTM photovoltaic short-term power prediction based on K-means hierarchical clustering[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(8): 1015-1022.

[28] 王睿琪,薛熙臻,黄阮明,等. 面向新能源波动平抑的储能多参数等价折算配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1498-1510.  
WANG Ruiqi, XUE Xizhen, HUANG Ruanming, et al. Multi-parameter equivalent conversion configuration method for energy storage with new energy fluctuation smoothing[J]. Power

System Technology, 2024, 48(4): 1498-1510.

[29] 姜欣,郑雪媛,胡国宝,等. 市场机制下面向电网的储能系统优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21): 4601-4610.  
JIANG Xin, ZHENG Xueyuan, HU Guobao, et al. Optimization of battery energy storage system locating and sizing for the grid under the market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4601-4610.

[30] 肖厦颖,范传光,郭峰,等. 基于改进多目标粒子群算法的储能电站定容选址优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 503-514.  
XIAO Xiaying, FAN Chuanguang, GUO Feng, et al. Optimal allocation of energy storage power station based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 503-514.

作者简介:



胡海鹏

胡海鹏(2000),男,硕士在读,研究方向为储能优化配置(E-mail: hhp18866941986@163.com);

赵平(1975),男,博士,讲师,研究方向为电力系统稳态与控制、可再生能源并网优化运行;

李妍(1971),女,博士,研究员,研究方向为电力系统运行与控制、配电网规划与评估、主动配电网技术等。

### Economic optimization configuration of energy storage in distribution network considering the attenuation of aging photovoltaic output

HU Haipeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Ping<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, HOU Qingxing<sup>1,2</sup>, WANG Guanghui<sup>1,2</sup>, LI Zhenxing<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. China Three Gorges University (Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security

Defense of Power System), Yichang 443002, China; 3. School of Electrical and Electronic

Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The escalating prevalence of aging distributed photovoltaic (PV) systems has given rise to challenges such as voltage fluctuations and curtailed energy production in large-scale grid-connected systems lacking energy storage. These issues can be effectively mitigated through the strategic deployment of energy storage solutions. In order to enhance the cost-effectiveness of energy storage configuration, an economic optimization method for distribution network energy storage that takes into account the attenuation of aging photovoltaic output is proposed. The impact of aging PV generation decay rate and operational lifespan on actual PV output is thoroughly analyzed, leading to the development of a mathematical relationship between PV output and rated energy storage power and capacity. Building upon this analysis, an optimization model for energy storage configuration is established with a focus on minimizing life cycle costs and reducing voltage deviations at distribution network nodes. This comprehensive approach considers factors such as construction operating costs, network losses, and peak-valley arbitrage income. Finally, particle swarm optimization is employed to solve this complex problem using the IEEE 33-node system. The results demonstrate that the proposed method can achieve significant reductions in both operating cost (33.91%) and life cycle cost (6.01%), thereby validating its economic effectiveness.

**Keywords:** energy storage configuration; attenuation of photovoltaic output; life cycle cost of energy storage; aging photovoltaic; economic optimization of energy storage; particle swarm optimization

(编辑 方晶)