XXXX

面向光伏功率波动灵活平抑及考虑SOC估计误差修正的BESS分组梯次功率分配策略

杨 毅[1]，朱猛猛[2]，程志远[3]，王常青[2]，李立洋[3]，张祥宇[4]
（[1]中国华电集团有限公司湖南分公司，湖南 长沙411199；[2]南京国电南自电网自动化有限公司，江苏 南京 211153；[3]华电（湖南）能源销售有限公司，湖南 长沙 410004；[4]新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学），河北 保定 071003）

摘 要：针对电池储能系统(Battery Energy Storage Systems，BESS)在平抑光伏功率波动时等效循环强度大、荷电状态(State of Charge，SOC)易越限、均衡度弱的问题，本文提出了面向光伏灵活平抑考虑SOC估计误差修正的BESS分组梯次功率分配策略。首先，为获取能同时平抑光伏波动、促进储能SOC恢复并减少储能能量吞吐的光伏并网指令，建立了一个多目标优化模型，并设计了改进摇摆门算法(Improved Swinging Door Trend, ISDT)，提升光伏平抑灵活性，进一步设计改进梦境优化算法(Improve Dream Optimization Algorithm, IDOA)优化ISDT，对优化模型进行高效求解；其次，提出了基于极度梯度提升树算法的SOC估计误差修正方法，当估计误差超出阈值时修正BESS内电池单元的SOC，据此将BESS划分为两个电池组，以通过减少充放电转换次数来降低等效循环强度，并避免电池组切换时的SOC越限；最后，构建基于最少电池单元的梯次运行机制以进一步降低BESS等效循环强度，并以SOC均衡为目标完成电池组的功率分配。采用某50MW光伏电站典型日发电数据与牛津电池老化数据集进行仿真验证，结果表明，相较于现有主流策略，所提策略可有效平抑光伏功率波动，将BESS的等效循环强度降低约4%，SOC估计误差降低约1.4%，同时避免了SOC越限，并提升了SOC均衡度。

关键词：光伏功率波动平抑；电池储能系统；估计误差修正；分组功率分配；摇摆门算法
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0339
中图分类号：TK 02　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-4239（XXXX）XX-1-14

Grouping-Based Echelon Power Allocation of BESS for Flexible PV Fluctuation Smoothing and SOC Estimation Error Correction

Yang Yi[1], Zhu Mengmeng[2], Cheng Zhiyuan, Wang Changqing[2], Li Liyang, Deng Junwen
([1]Huadian (Hunan) Energy Sales Co., Ltd., Changsha 415699, Human, China; [2]Nanjing SAC Software Engineering Co., Ltd., Nanjing 211153, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problems of high equivalent cycling intensity, easy state of charge (SOC) limit violation, and poor balancing performance of battery energy storage systems

收稿日期：2026-04-18；**修改稿日期：**2026-06-01。
基金项目：华电（湖南）能源销售有限公司科技项目（基于AI与大数据的虚拟电厂关键技术研究与应用）；国家自然科学基金资助项目（No. 52277100）。
第一作者：杨毅，男，工程师（工程技术类），中国华电集团有限公司湖南分公司市场营销部副主任，E-mail：yybrood@163.com。**通信作者：**程志远，男，工程师（工程技术类），从事电力市场、虚拟电厂相关管理与运营技术研究，E-mail：2281713564@qq.com
引用本文：杨毅, 朱猛猛, 程志远, 等. 面向光伏功率波动灵活平抑及考虑SOC估计误差修正的BESS分组梯次功率分配策略[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-14.
Citation： Yang Yi, Zhu Mengmeng, Cheng Zhiyuan, et al. Grouping-Based Echelon Power Allocation of BESS for Flexible PV Fluctuation Smoothing and SOC Estimation Error Correction[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-14.

(BESS) when suppressing photovoltaic (PV) power fluctuations, a grouped echelon power allocation strategy is proposed for BESS considering SOC estimation error correction for flexible PV fluctuation suppression. First, to obtain PV grid-connected commands that can simultaneously suppress PV fluctuations, promote BESS SOC recovery, and reduce energy storage losses, a multi-objective optimization model is established. An improved swinging door trend (ISDT) algorithm is designed to enhance the flexibility of photovoltaic smoothing. Furthermore, an improved dream optimization algorithm (IDOA) is developed to optimize the ISDT and efficiently solve the optimization model. Second, a SOC estimation error correction method based on Extreme Gradient Boosting is proposed. When the estimation error exceeds the preset threshold, the SOC of battery units in BESS is corrected. Based on the corrected SOC, BESS is divided into two functionally complementary battery groups, which reduces the equivalent cycling intensity by decreasing the number of charge-discharge conversions and avoids SOC limit violations during group switching. Finally, an echelon operation mechanism based on the minimum number of battery units is constructed to further reduce the equivalent cycling intensity of BESS, and power allocation among battery groups is completed with the goal of SOC balancing. Simulation verification is carried out using typical daily generation data of a 50 MW PV power station and the Oxford Battery Degradation Dataset. The results show that compared with existing mainstream strategies, the proposed strategy can effectively suppress PV power fluctuations, reduce the equivalent cycling intensity of BESS by approximately 4%, decrease the SOC estimation error by about 1.4%, avoid SOC limit violations, and improve SOC balancing performance.

Keywords: photovoltaic power fluctuation suppression; battery energy storage system; estimation error correction; grouping power allocation; swinging door trend

1 引言

在全球能源转型与“双碳目标”引领下，光伏发电已成为构建新型电力系统、推动绿色低碳转型的重要支撑[1]。截至2025年底，全国光伏发电装机容量达11.25亿千瓦，同比增长45.7%，连续多年居全球首位[2]。但光伏出力受日照、温度等自然因素影响，具有显著的随机性、间歇性与波动性，短时功率骤变对电网稳定运行冲击显著[3-4]。电池储能系统（Battery Energy Storage System, BESS）以响应速度快、能量密度高的优势，已成为平抑光伏功率波动、提升并网友好性的关键手段[5]。

然而，光伏功率高频、大幅波动迫使BESS频繁充放电状态切换，导致其等效循环强度激增，加速电池老化与寿命衰减[6]。同时，频繁充放电易引发BESS单元荷电状态（State of Charge, SOC）越限，且单元间的SOC均衡性难以维持，严重削弱了储能系统的整体性能与可持续运行能力[7]。因此，如何协同优化光伏并网功率与BESS自身运行状态，特别是降低等效循环强度、避免SOC越限、提升均衡度，已成为当前光伏配储场景下亟待解决的关键瓶颈问题。

围绕BESS平抑光伏功率波动，现有研究方法主要可归纳为三类。第一类为基于优化算法的平抑方法，这类方法通过构建以光伏波动率最小[8]或引入储能等效循环强度[9]等为目标的优化模型，直接求解BESS的优化功率。其原理直观，但计算复杂度较高。第二类为基于滤波算法的平抑方法，其核心思路是通过变分模态分解[10]等滤波手段分离光伏功率中的高频波动分量，并由BESS进行补偿。文献[11]则进一步结合BESS的SOC动态调整滤波强度，以促进SOC恢复。但此类方法难以准确量化并网波动率约束，易引发“过度平抑”问题，致使BESS承担不必要的补偿功率，反而增大其等效循环强度，缩短储能使用寿命。第三类为基于数据压缩的平抑方法，此类方法通过设定阈值压缩对原始

光伏功率曲线进行平滑处理，直接生成并网功率指令。如文献[12]基于摇摆门（Swinging Door Trend，SDT）算法平抑光伏原始功率，但未充分考虑光伏并网波动率的约束要求。为进一步提升平抑效果，文献[13]引入了并网波动率约束，但过于频繁的动作会快速消耗BESS备用容量，致使其SOC跌至较低水平。为此，文献[14]纳入BESS动作次数，文献[15]则基于改进雨流计数法（Rain-Flow Counting Algorithm，RCA），兼顾光伏平抑及SOC恢复，保障了光伏平稳并网及BESS可持续运行。然而，当前数据压缩算法的压缩阈值多为固定值，无法根据光伏功率时变波动特性动态调节，限制了平抑策略的灵活性；同时现有方法普遍未考虑BESS承担的功率，使其能量吞吐过高，增大平抑过程的等效循环，造成储能资源的过度使用，甚至导致其提前退役。因此，亟需研究兼顾波动平抑、SOC恢复与低能量吞吐的灵活光伏平抑方法。

在获取光伏并网指令后，如何将其合理分配至BESS内部各电池单元（Battery Unit，BU），是保证平抑目标实现、同时优化BESS内部运行的关键。只是，在平抑光伏功率波动时，BESS常需频繁充放电转换，会大幅提升其等效循环强度[15]。为此，分组均衡功率分配策略将BESS分为两个电池组，分别使其主要承担充、放电功率以降低系统整体的充放电转换，进而降低BESS等效循环强度[16]。该类策略包含分组及组内功率分配两个核心环节。在分组环节，现有研究主要依据SOC[17, 18]、实际可用容量[19]或备用容量偏差[20]等指标，基于实际可用容量或备用容量偏差将BU划分为两个功能互补的电池组，即优先充电组与优先放电组。从本质上看，这些分组方法仍由SOC驱动。因此，这类方法均依赖于SOC的估计值。在实际运行中，SOC估计误差的存在易导致“分组失准”问题，不仅可能引发组级SOC越限，更威胁系统安全运行。在功率分配环节，现有研究也常以SOC均衡为控制目标，通过设计梯次运行机制来减少BESS充放电转换次数，从而降低其等效循环强度[16]。部分研究进一步以最小化BU动作次数最小[21]或结合BESS参考功率特征为目标[22]优化各BU功率；但这类优化策略复杂度高，且均未在功率分配过程中考虑SOC估计误差的影响，其实际效果与SOC均衡能力受限。特别地，SOC估计误差也会影响功率分配结果，影响BESS的SOC按计划恢复。因此，一种能兼顾动作次数降低并计及SOC估计误差的BESS分组功率分配策略，还需进一步深入研究。

为此，针对上述BESS在平抑光伏并网功率波动时存在的并网指令多目标协同能力不足、分组失准易引发SOC越限、功率分配精度低且循环强度高的难题，本文提出了面向光伏灵活平抑考虑SOC估计误差修正的BESS分组梯次功率分配策略。首先，提出了基于改进梦境优化算法（Improve Dream Optimization Algorithm，IDOA）优化改进摇摆门算法（Improved SDT，ISDT）的光伏并网功率指令获取方法；该部分先构建了同时考虑光伏波动平抑、SOC恢复与能量吞吐量最小化的多目标优化模型，并将ISDT作为波动平抑算法，进一步引入具有自适应退出机制的IDOA，基于多目标优化模型求解最优的ISDT的时变压缩阈值，获取光伏并网指令及BESS参考功率。其次，设计了考虑SOC估计误差的BESS分组方法；该部分先基于极度梯度提升树（Extreme Gradient Boosting, XGBoost）算法构建SOC估计误差修正方法，当估计误差超出预设阈值时对BU的SOC进行修正，并参照SOC的修正结果基于动态分组方法实现BESS分组，避免了SOC估计不准导致的不当分组与电池组切换过程中的SOC越限问题；最后，提出了基于最少运行单元、面向SOC均衡提升的电池组梯次功率分配策略；该部分构建了以最少运行单元参与分配的梯次运行机制，结合参考功率与SOC修正结果确定参与功率分配的BU，通过大幅减少充放电转换次数降低系统等效循环强度；进一步构建了充放电函数考虑SOC评估BU的充放电能力，并以充放电能力为分配比例将BESS参考功率分配给BU，实现了以SOC均衡为目标的精准功率分配，提升了BESS的整体均衡与可持续运行能力。

在上述方法中，IDOA为外层优化器，优化ISDT的阈值参数；ISDT为内层平抑核心，生成光伏并网指令，二者共同构成光伏平抑的过程闭环；XGBoost用于SOC校准，为后续分组提供精准SOC输入，方便将BESS分为两个电池组；梯次运行机制针对各电池组，用于确定参与功率分配的

电池组及BU，功率分配策略则针对参与分配的BU，基于修正后的SOC完成均衡功率分配。这些方法各司其职、逐级衔接，形成逐级递进的完整技术路线。

2 基于IDOA-ISDT的光伏并网功率指令获取

2.1 兼顾波动抑制及能量吞吐的光伏并网指令获取优化模型

为获取能同时平抑光伏波动、降低其能量吞吐并促进储能SOC恢复，本节首先对光伏功率波动特性、BESS的SOC变化及能量吞吐进行量化，计算式如下：

$$P_{\mathrm{bess}}(t)=P_{\mathrm{pv}}(t)-P_{\mathrm{g}}(t) \tag{1}$$

$$V_{\mathrm{pv}}=\sum_{t=0}^{T_1}\left(\max_{t_i\leqslant t\leqslant t_i+1\mathrm{min}}\left(P_{\mathrm{g}}(t)\right)-\min_{t_i\leqslant t\leqslant t_i+1\mathrm{min}}\left(P_{\mathrm{g}}(t)\right)\right) \tag{2}$$

$$\Delta S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess}}=\frac{\sum_{t=0}^{T_1}\left(P_{\mathrm{bess}}(t)\cdot\Delta t\right)}{E^{\mathrm{N}}_{\mathrm{bess}}} \tag{3}$$

$$E_{\mathrm{bess}}=\sum_{t=0}^{T_1}\left|P_{\mathrm{bess}}(t)\cdot\Delta t\right| \tag{4}$$

式中，$P_{\mathrm{g}}(t)$、$P_{\mathrm{pv}}(t)$及$P_{\mathrm{bess}}(t)$分别表示t时刻光伏并网功率指令值、原始功率值与BESS参考功率；t_i为第i个时间间隔，每个时间间隔1min；T_1为调度周期时长；Δt为时隙时长；$E^{\mathrm{N}}_{\mathrm{bess}}$为BESS额定容量；$V_{\mathrm{pv}}$为光伏平均波动率，反映光伏并网的波动程度；$\Delta S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess}}$为BESS的SOC变化量，表征BESS在平抑周期前后的SOC差异；E_{bess}为BESS在平抑周期的能量吞吐量，表征BESS在平抑过程中承担的电量。

基于上述量化指标，构建以最小化光伏平均波动率、SOC恢复偏差及BESS能量吞吐量为目标多目标优化模型，目标函数为：

$$f=\alpha_1\cdot V_{\mathrm{pv}}+\alpha_2\cdot\left|S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess0}}+\Delta S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess}}-0.5\right|+\alpha_3\cdot E_{\mathrm{bess}} \tag{5}$$

式中，$S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess0}}$为BESS的初始SOC；$\alpha_1$、$\alpha_2$及$\alpha_3$为权重系数，用于统一各目标量纲，参考文献[14]的方法，分别取0.1、10及0.001。

模型需满足约束条件如下：

$$\max\left(\max_{t_i\leqslant t\leqslant t_i+1\mathrm{min}}\left(P_{\mathrm{g}}(t)\right)-\min_{t_i\leqslant t\leqslant t_i+1\mathrm{min}}\left(P_{\mathrm{g}}(t)\right)\right)\leqslant 10\%P^{\mathrm{N}}_{\mathrm{pv}} \tag{6}$$

$$\max\left(\left|P_{\mathrm{bess}}(t)\right|\right)\leqslant P^{\mathrm{N}}_{\mathrm{bess}} \tag{7}$$

$$0.4\leqslant S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess0}}+\Delta S^{\mathrm{c}}_{\mathrm{bess}}\leqslant 0.6 \tag{8}$$

式中，$P^{\mathrm{N}}_{\mathrm{pv}}$为光伏电站装机容量；$P^{\mathrm{N}}_{\mathrm{bess}}$为BESS额定功率。

该模型通过多目标协同优化实现三大目标：通过最小化光伏功率波动率平均值V_{pv}，有效平抑并网波动；文献[15]指出，在整个光伏平抑周期始末，BESS的SOC应恢复至0.5附近，因此模型引入初始SOC项，确保BESS在不同SOC初值下均可实现SOC恢复。另外，单一时间间隔内，BESS承担的功率与等效循环强度呈线性关系，而等效循环强度进一步与BESS老化线性相关[23]；由此，该模型以整个平抑周期内BESS能量吞吐为指标，并将其引入目标函数；通过最小化BESS能量吞吐，降低其等效循环强度，避免储能资源的过度使用，防止其提前退役。同时，模型设置多个约束条件以保障系统安全与性能：式(6)限制单时段并网功率波动率，满足电网并网要求；式(7)避免BESS功率越限，保障设备安全运行；式(8)则参考文献[16]，使平抑结束时BESS的SOC与0.5的偏差小于0.1。

2.2 基于IDOA-ISDT的模型求解算法

为高效求解上述模型，本节设计了一种基于数据压缩的分层优化方法：内层采用ISDT生成并网指令，外层采用IDOA对ISDT的关键参数进行寻优。其中，ISDT用于光伏平抑，应用前提是光伏功率数据是连续时间序列且采样时间间隔保持一致；这样可保证压缩阈值$E(k)$非负，且与采样尺度相关。IDOA则是一种适配于求解含复杂目标函数与非线性约束问题的优化算法，其搜索范围由多目标优化模型的约束条件限定；若候选阈值向量解不满足式(6)—式(8)任一约束，则该候选解在适应度评价中被判定为不可行解，避免不满足工程约束的并网指令进入后续BESS功率分配环节。

2.2.1 ISDT的平抑原理

SDT的核心思想是设定固定波动阈值，模拟“摇摆门”的开合逻辑，剔除原始光伏功率曲线中的冗余波动分量，进而生成平滑的并网功率指令[12]。为提升平抑灵活性，本文将SDT的固定压缩偏移量E调整为时变压缩阈值，构建压缩阈值向量为优化变量，具体实现步骤如下：

步骤1 参数初始化：

$$\begin{cases}k_{1\mathrm{d}}=\dfrac{P_{\mathrm{pv}}(2)-\left(P_{\mathrm{pv}}(1)+E(1)\right)}{t_2-t_1}\\[2ex] k_{2\mathrm{d}}=\dfrac{P_{\mathrm{pv}}(2)-\left(P_{\mathrm{pv}}(1)-E(1)\right)}{t_2-t_1}\end{cases} \tag{9}$$

式中：t_1、t_2分别为初始时刻及第2个时刻；$k_{1\mathrm{d}}$

和k_{2d}分别为上、下支点门斜率的初始值；$P_{pv}(1)$、$P_{pv}(2)$分别表示初始时刻及第2个时刻光伏原始功率值；$E(1)$为初始时刻的压缩阈值。

步骤2 功率偏差判断：

$$\mathbf{E}=\{E(1),E(2),\cdots,E(k),\cdots,E(m-1),E(m)\} \tag{10}$$

$$\begin{cases} k_1=\dfrac{P_{pv}(j)-\left(P_{pv}(k)+E(k)\right)}{t_j-t_k} \\ k_2=\dfrac{P_{pv}(j)-\left(P_{pv}(k)-E(k)\right)}{t_j-t_k} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{E}$为压缩阈值向量；$E(k)$为第k个时刻的压缩阈值；m为平抑周期的时隙总数；t_j、t_k分别为第j、k个时刻；$P_{pv}(j)$、$P_{pv}(k)$分别表示第j、k个时刻光伏原始功率值；k_1和k_2分别为上、下支点门斜率的迭代值。式(10)引入了时变压缩阈值并构建为压缩阈值向量$\boldsymbol{E}$，使各时刻的平抑强度具备动态调节能力，显著提升了SDT的灵活性。但各时刻压缩阈值之间存在较强的耦合特性，需采用优化算法求解最优阈值向量。

步骤3 趋势线段更新：

$$\begin{cases} k_{1d}=\max(k_1,k_{1d}) \\ k_{2d}=\max(k_2,k_{2d}) \end{cases} \tag{12}$$

步骤4 输出并网功率序列：

$$k_{1d}\leqslant\frac{P_{pv}(j)-P_{pv}(k)}{t_j-t_k}\leqslant k_{2d} \tag{13}$$

若功率值满足式(13)，则返回步骤3继续迭代；否则将前一时刻的功率值$P_{pv}(j\text{-}1)$记录为并网数据，并返回步骤2重新计算。最终，原始功率与并网功率的差值，即为BESS需补偿的功率。

通过动态调整压缩阈值，ISDT可在每个时刻自适应更新上下支点门斜率，从而将不同波动强度光伏功率纳入支点门中，增强了平抑算法对光伏波动特性的适应性，实现了差异化平抑。这种做法虽能提升平抑算法的灵活性，但也耦合了各时刻的压缩阈值，大幅增加了优化求解的难度。考虑到DOA在求解含复杂目标函数与非线性约束问题时的稳定性和鲁棒性，本文采用DOA对ISDT的压缩阈值向量进行优化，以实现其平抑效果与运行性能的双重提升。

2.2.2　IDOA的改进原理及阈值寻优

(1) DOA基本原理及其改进

DOA是受人类梦境自组织特性启发的智能优化算法，主要包含初始化、勘探和开发三个核心阶段[23]。在初始化阶段，初始化全部个体，并记录初始最优个体位置$x^{(0)}_{best}$及其适应度值，作为后续迭代寻优的基准。在勘探阶段（从迭代开始至预设调节步数T_d），每轮迭代先将所有个体分组，并将其位置重置至组内历史最优位置，再随机更新个体的位置；该阶段侧重于全局大范围寻优，通过多种策略维持种群多样性，避免算法陷入早熟收敛。在开发阶段（从预设调节步数T_d至预设迭代停止步数T_{max}），每轮迭代前所有个体共享全局历史最优个体位置$x^{(t)}_{best}$，引导个体在最优值附近进行局部精细搜索，提升算法的收敛精度。

DOA这种全局勘探+局部开发步骤适用于优化ISDT耦合的阈值向量，然而，原始DOA的勘探阶段采用固定切换步数T_d，切换逻辑僵化。更特别的是，为避免陷入局部最优解，DOA的初始化个体的数量、T_{max}设置的均较大。若算法在勘探阶段早期已完成全局大范围勘探，且已逼近较优解，仍需达到预设步数T_d才能转入开发阶段；这会产生大量无效迭代，导致收敛缓慢。算法在开发阶段也存在类似的问题。

针对这一缺陷，本文引入自适应退出机制对原始DOA进行改进，提出IDOA：设置计数器k_{flag}记录最优值未更新的连续迭代步数；在勘探阶段，当迭代步数达到T_d或k_{flag}大于计数器阈值时自动进入开发阶段；在开发阶段，当迭代步数达到T_{max}或k_{flag}大于计数器阈值时，IDOA停止迭代，返回迭代结果。计数器阈值可仿照文献[15]的设计方法，设计为$T_{max}/10$。这样既保留了原始DOA优化ISDT耦合阈值向量的精度优势，又避免算法长时间停留在勘探阶段或开发阶段，产生过多的无效迭代，解决了其阶段切换僵化、收敛速度慢的缺陷。

特别地，考虑到设置的计数器阈值与预设迭代停止步数有关，且T_{max}设置一般较大；因此，在$T_{max}/10$附近微调不会明显改变IDOA的优势，即具有较低的参数敏感度。

(2)　IDOA优化ISDT的模型求解流程

IDOA优化ISDT算法采用外层IDOA寻优、内层ISDT执行的分层嵌套求解架构，实现流程如图1所示。以原始光伏功率为输入，以ISDT的压缩阈值偏移向量$\boldsymbol{E}$为优化变量，以2.1节多目标优化模型的目标函数（即，式(5)）为适应度函数。运行过程中，内层ISDT基于当前阈值向量生成光伏

并网功率指令，馈入外层IDOA进行适应度评价：若生成指令违反式(6)—(8)的约束条件，适应度取极大值；否则按式(5)计算适应度。IDOA通过迭代寻优更新阈值向量并反馈至ISDT，形成闭环优化，直至收敛得到全局最优阈值向量。最后，将最优阈值向量代入ISDT，生成光伏并网功率指令。由于IDOA的迭代目标为适应度函数最低，按上述步骤生成的光伏并网功率指令必然满足式(6)—(8)的约束条件，且可以兼顾平抑效果、SOC恢复与低循环强度。

在上述求解流程中，ISDT承担原始光伏功率序列的数据压缩和平滑指令生成任务，其输出$P_g(t)$进一步确定BESS参考功率$P_{bess}(t)$；IDOA作为外层参数寻优器，在式(6)—式(8)约束下，以式(5)最小为目标优化ISDT的时变压缩阈值向量$\boldsymbol{E}$。因此，IDOA-ISDT的输出是后续BESS分组功率分配的参考功率，方便BESS分组与功率分配进行。

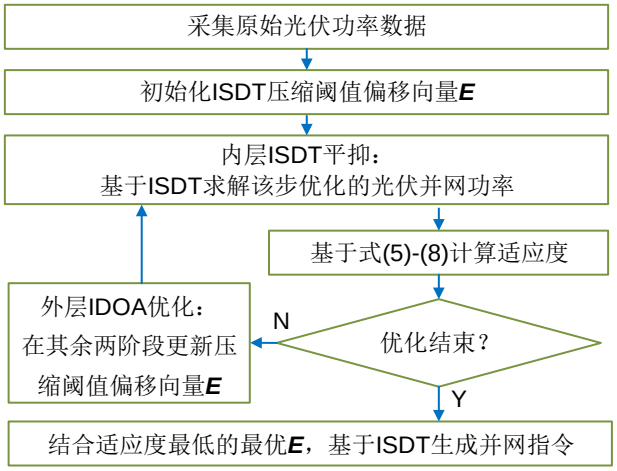


图1 IDOA优化ISDT的光伏并网指令获取流程

Fig. 1 Photovoltaic Grid-Connected Instruction Acquisition Process Flowchart Based on IDOA improved ISDT

3 考虑SOC估计误差修正的BESS分组方法

本文研究的BESS采用光伏侧集中式并网结构如图2所示。光伏电站经升压变压器接入公共连接点，BESS通过双向变流器接入同一交流母线，并与光伏出力共同形成并网功率。BESS内部由$2N_{bess}$个BU并联构成，每个BU由电池簇及其电池管理系统组成，具备独立SOC采集、功率限值约束和充放电控制能力。上层能量管理系统根据IDOA-ISDT生成的$P_{bess}(t)$下发参考功率，下层依据修正后BU的SOC完成分组与组内功率分配。

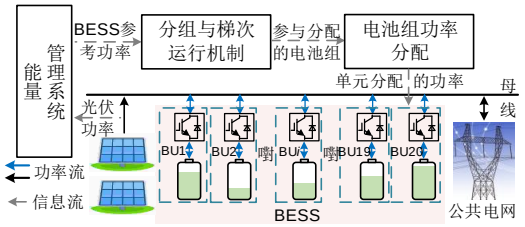


图2 BESS拓扑结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of BESS Topology Structure

3.1 SOC估计误差修正

为最大限度降低SOC初始估计误差，本文采用XGBoost算法开展SOC初始估计。XGBoost是在梯度提升树（Gradient Boosting Decision Tree，GBRT）基础上改进的高效算法，兼具线性规模求解器和树学习算法的优势，具备模型复杂度低，泛化能力高、鲁棒性强等特点[24]。此处的XGBoost仅用于SOC估计误差识别与修正，输出为修正后的各BU的SOC估计值，作为动态分组和组内功率分配的状态输入。

本文采取的SOC计算表达式如下：

$$S_c = \frac{Q_0}{Q_N} \tag{14}$$

式中，S_c为SOC；Q_0为电池当前状态存储的电荷量；Q_N为电池额定容量。

基于XGBoost的估计过程如下：以BU采样得到的端电压、电流和温度作为XGBoost回归模型的输入特征，以实验标定或安时积分得到的SOC值作为训练标签，先离线完成模型训练；在线运行时，将BMS实时采集的电压、电流和温度输入训练后的模型，得到第h时刻各BU的初始SOC估计值$S_{cbk,h}$。随后利用MAE和RMSE评价初始估计误差，若误差指标超过式(19)设定的精度要求，则进一步采用概率密度函数与三阶最小二乘拟合残差对初始SOC进行修正，得到用于动态分组和功率分配的修正SOC值$S_{cbk,h}$。

因此，这类方法应用约束主要包括：需具备相应的运行数据及历史样本。若传感数据缺失严重或运行状态超出训练样本覆盖范围，应先补充样本或重新训练模型，以避免修正结果失真。

进一步地，本文设置平均绝对误差（Mean

Absolute Error，MAE）和均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）两项指标评价估计精度：

$$E_{\mathrm{MA}}=\frac{1}{M}\sum_{t=1}^{M}\left|y_h-\hat{y}_h\right| \tag{15}$$

$$E_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{t=1}^{M}\left(y_h-\hat{y}_h\right)^2} \tag{16}$$

式中：E_{MA}为电池的MAE；E_{RMS}为电池的RMSE；y_h为h时刻电池SOC的真实值；M为待估计的BU个数。记录待修正SOC估计值的数据点S_i为(z_i,y_i)，其中z_i为采样时刻，y_i为对应采样电荷量，二者满足函数关系$y_i=\psi(z_i, I_1, I_2, \cdots, I_{af})$，其中$I_1, I_2, \cdots, I_{af}$为影响SOC估计值的参数。考虑到电压、电流、温度等电气量与环境因素等均与电池SOC呈非线性关系[25]，本文选取上述3个参数作为影响因子，即I_{af}=3。设定SOC期望值为〈S〉，则SOC估计值S_i围绕期望值波动，其概率密度函数可表示为：

$$p(S_i)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\gamma_i}\exp\left\{-\frac{\left(S_i-\langle S\rangle\right)^2}{2\gamma_i^2}\right\} \tag{17}$$

式中，γ_i为SOC估计目标RMSE。

为兼顾运算效率与工程可行性，同时适配自变量与因变量之间的复杂非线性关系，本文采用最小二乘法结合概率密度函数开展SOC值修正。为避免最小二乘法拟合曲线两端易出现的龙格震荡现象[26]，同时保证拟合精度，选取三阶多项式进行拟合。拟合目标为最小化MAE与RMSE两个误差指标的平方和，实现对原始SOC估计值的修正更新，计算式为：

$$S_{ck,h}=S_{cbk,h}+\varepsilon(i) \tag{18}$$

式中，$S_{ck,h}$为第h时刻第k个BU完成估计误差修正后的SOC值；$S_{cbk,h}$为第h时刻第k个BU的初始SOC估计值；(i)为服从概率密度函数$p(S_i)$的最小二乘拟合残差值。通过上述步骤，即可实现BU的SOC估计值修正，整体流程如图3所示。该算法面向各BU的SOC估计误差修正，对差异化的SOC初值具有良好的适应性。

3.2　BESS动态分组

为消除SOC估计误差对分组精度的影响，本文设计了考虑SOC估计误差修正的BESS动态分组方法。首先，根据BU各项运行数据，通过XGBoost算法完成SOC初始估计，再依据式(19)判断各BU的SOC估计误差是否满足精度要求；当

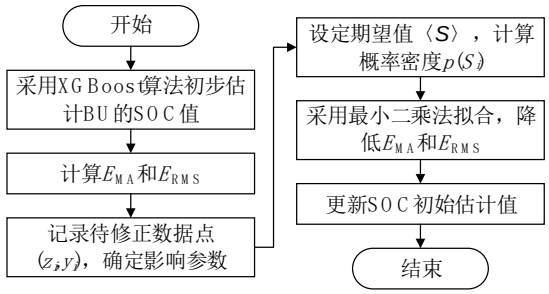


图3　BU的SOC修正流程

Fig. 3　SOC correction of BU flow chart

所有BU的SOC均满足该式要求时，无需进行误差修正；若存在BU不满足要求，则通过式(17)、(18)对其SOC进行误差修正。

$$\begin{cases}E_{\mathrm{MA}0}\leqslant 2.5\%\\ E_{\mathrm{RMS}0}\leqslant 3\%\end{cases} \tag{19}$$

式中，E_{MA0}为SOC初始估计值的MAE；E_{RMS0}为SOC初始估计值的RMSE。

为降低BESS运行过程中的等效循环强度，本研究将全部BU划分为两个容量相等的功能互补电池组：平均SOC偏低的优先充电组与平均SOC偏高的优先放电组。针对$2N_{\mathrm{bess}}$个BU构成的BESS，初始时刻将SOC偏低的N_{bess}个BU划归至优先充电组，SOC偏高的N_{bess}个BU划归至优先放电组。系统运行过程中，若存在BU的SOC估计误差不满足式(19)的要求，则触发重新分组；若任意BU的SOC值超过预设上下限阈值，便对两组的充放电功能进行互换，避免SOC越限。其中，为预留一个时隙的调节裕度，避免下一时隙个别BU承担最大功率导致SOC越限，SOC预设上、下限S_{pmax}和S_{pmin}的计算式如下：

$$\begin{cases}S_{\mathrm{pmax}}=S_{\max}-\Delta S_{\max}\\ S_{\mathrm{pmin}}=S_{\min}-\Delta S_{\max}\end{cases} \tag{20}$$

$$\Delta S_{\max}=\left(P_{\mathrm{buN}}\Delta t\right)/E_{\mathrm{bu}} \tag{21}$$

式中，P_{buN}为BU的额定功率；$S_{\max}$与$S_{\min}$依次为SOC运行上限与运行下限；E_{bu}为BU额定容量；$\Delta S_{\max}$为一个时隙BU的最大SOC变化量。

因此，SOC误差修正与动态分组之间属于“状态校准—分组决策”的承接关系：XGBoost及残差修正过程只提供修正后的SOC估计值，分组规则再依据该SOC值确定优先充电组和优先放电组；当前时刻输出的修正SOC发生显著变化或误差超过阈值时，才触发重新分组。

4 面向SOC均衡的电池组梯次功率分配策略

在获得BESS参考功率和修正后BU的SOC后，梯次运行机制与基于充放电函数的功率分配规则共同完成电池组功率分配。其中，运行机制确定参与运行的电池组，充放电函数则根据SOC计算参与运行BU的充放电比例，按比例完成功率分配。

本文中的SOC均衡策略包括两个层面：组间层面，将SOC偏低（高）单元划入优先充（放）电组，使充（放）电功率优先分配给低（高）SOC单元；组内层面，设计了充放电函数，充（放）电时低（高）SOC单元被分配更高的功率比例，在满足BU功率约束的前提下促进SOC逐步均衡。

4.1 基于最少运行单元的电池组梯次运行机制

现有分组功率分配策略可大幅降低BESS的充放电转换次数；只是优先充（放）电组在承担放（充）电指令时需整组参与，削弱了策略降低充放电转换次数的效果。为此，本文提出基于最少运行单元的电池组梯次运行机制，具体运行规则如表1所示。表1中，P_{gcN}为优先充电组的额定功率，P_{gdN}为优先放电组的额定功率；两者由组内电池单元的额定功率求和而得。该机制以BESS参考功率$P_{bess}(t)$为输入，首先判断BESS的充放电工作状态并确定各电池组的动作优先级，再根据各电池组的额定功率与既定动作优先级完成功率分配。其核心运行原则为：当优先动作组功率能力不足时，仅调用互补组中部分SOC最适宜（充电时调用SOC最低的BU，放电时调用SOC最高的BU）的单元进行补充，以最大限度减少单一时间间隔内参与充放电动作的BU数量，降低系统整体充放电转换次数。

表1 BESS梯次运行机制

Table 1 Cascade Operation Mechanism of BESS

条件	参与运行的电池组
充电过程$P_{bess}(t)>0$且$P_{bess}(t)\leqslant P_{gcN}$	优先充电组
充电过程$P_{bess}(t)>0$且$P_{bess}(t)> P_{gcN}$	优先充电组+优先放电组中SOC最低的部分BU
放电过程$P_{bess}(t)<0$且$\lvert P_{bess}(t)\rvert\leqslant P_{gdN}$	优先放电组
放电过程$P_{bess}(t)<0$且$\lvert P_{bess}(t)\rvert> P_{gdN}$	优先放电组+优先充电组中SOC最高的部分BU

上述梯次运行机制选用电池组额定功率作为单组—多组运行的切换条件，既可以保证参考功率被准确跟踪，又可以避免电池组承担过多的功率，具有较高的有效性。此外，该机制通过减少单一时间间隔内参与充放电动作的BU数量，减少不必要的BESS充放电转换，进一步降低其等效循环强度。

4.2 基于梯次运行机制的电池组SOC均衡功率分配策略

在通过上述机制确定参与运行的电池组及具体BU后，需在各BU间分配具体的功率值。为提升电池组内BU的SOC均衡度，分配应遵循“低SOC者多充少放，高SOC者多放少充”的原则。为此，本文采用反正切函数描述BU的充放电特性，以此表征不同SOC状态下BU的充放电能力[20]，充放电函数如式(22)和(23)所示。当BESS参考功率$P_{bess}(t)>0$，系统处于充电工况时，充电函数为：

$$f_{ch}(S_{c\,k,h}) = 0.5 - 0.33 \cdot \arctan\left(2 \cdot (S_{c\,k,h} - 0.5)\right) \quad (22)$$

当参考功率$P_{bess}(t)<0$，系统处于放电工况时，放电函数为：

$$f_{dis}(S_{c\,k,h}) = 0.5 + 0.33 \cdot \arctan\left(2 \cdot (S_{c\,k,h} - 0.5)\right) \quad (23)$$

式中，f_{ch}、f_{dis}分别为充、放电函数。

基于上述充放电函数，本文制定以SOC均衡为目标的功率分配策略。电池组处于充电工况时，各BU的功率分配需满足：

$$\frac{P_{buk,h}}{f_{ch}(S_{c\,k,h})} = \frac{P_{buv,h}}{f_{ch}(S_{c\,v,h})} \quad \forall k,v \in \mathrm{N}^{*} \quad (24)$$

电池组处于放电工况时，各BU的功率分配需满足：

$$\frac{P_{buk,h}}{f_{dis}(S_{c\,k,h})} = \frac{P_{buv,h}}{f_{dis}(S_{c\,v,h})} \quad \forall k,v \in \mathrm{N}^{*} \quad (25)$$

式中：$P_{buk,h}$、$P_{buv,h}$分别为第h时刻第k个、第v个BU分配的功率；$S_{cv,h}$为第h时刻第v个BU的SOC。

此外，BU运行过程中通常不采用高倍率充放电模式，因而各BU分配的功率还需满足以下约束条件：

$$P_{buv,h} = \begin{cases} \lvert P_{bu\max}\rvert, & P_{buv,h} > \lvert P_{bu\max}\rvert \\ P_{buv,h}, & -\lvert P_{bu\max}\rvert \leqslant P_{buv,h} \leqslant \lvert P_{bu\max}\rvert \\ -\lvert P_{bu\max}\rvert, & P_{buv,h} < -\lvert P_{bu\max}\rvert \end{cases} \quad (26)$$

式(24)、(25)所示功率分配仅在梯次运行机制确定参与运行的电池组中执行；输入为BESS参考功率及误差修正后的SOC。功率分配的约束条件包括BU功率限值、SOC运行上下限，以避免功率的过度分配，保障运行安全与功率分配精准。

5　仿真验证与结果分析

5.1　仿真参数设置及对比策略设计

5.1.1　仿真参数设置

本文以某额定装机容量为50MW的光伏电站典型日运行数据为例开展仿真验证。参考文献[27]中光伏电站辅助并网的储能优化配置方法，配套BESS规模为8MW/8MWh，由20个额定容量为400kW/400kW·h的BU并联组成，BESS拓扑与前述结构保持一致。仿真初始时刻，各BU的SOC为：0.41、0.42、0.43、0.44、0.45、0.46、0.47、0.48、0.49、0.50、0.51、0.52、0.53、0.54、0.55、0.56、0.57、0.58、0.59、0.60。设定BU的SOC运行上、下限阈值分别为0.9、0.1；光伏功率数据的采样时隙为1 min。

5.1.2　对比策略设计

为全面评估本文所提策略的优越性，分别就光伏并网指令获取与BESS功率分配两个环节，设计多组对比策略。

在光伏并网指令获取环节，为验证所提IDOA优化ISDT方法（简记为IDOA-ISDT方法）的优势，选取粒子群算法（Particle Swarm Optimization, PSO）、天牛须算法（Beetle Antennae Search, BAS）、算术优化算法（Arithmetic Optimization Algorithm, AOA）优化ISDT策略作为对比，并进一步引入文献[15]提出的基于天鹰优化算法（Aquila Optimizer, AO）优化的RCA的策略作为参照。

在BESS分组功率分配环节，为验证本文所提分组与分配策略在降低等效循环强度、促进SOC均衡及避免SOC越限方面的效果，选取4种主流策略进行对比：策略1为文献[17]所提以组内SOC差异最小为目标的分组策略；策略2为文献[19]所提在电池组间备用容量偏差超出阈值时触发的强制分组策略；策略3为采用常规SOC均衡功率分配的分组策略[22]；策略4为不分组策略，直接以SOC均衡为目标在所有BU间进行功率分配[8]。上述对比策略均未考虑SOC估计误差。

5.2　光伏功率波动平抑效果分析

5.2.1　DOA-ISDT算法迭代性能分析

设置种群数量为30，最大迭代次数为1000。将IDOA-ISDT独立运行100次，选取其中适应度函数值最低的迭代过程进行分析。图4展示了IDOA-ISDT、DOA-ISDT、AOA-ISDT、PSO-ISDT、BAS-ISDT及AO-RCA等6种算法的目标函数值迭代曲线。为保证对比公平性，所有算法均在IDOA-ISDT达到最大迭代次数时停止计算。

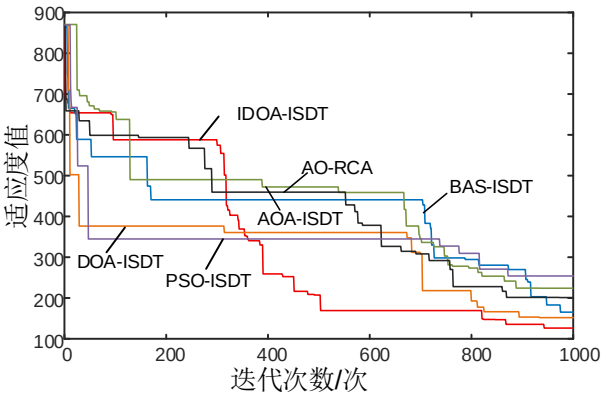


图4　6种算法目标函数值迭代曲线对比

Fig. 4　Comparison of Objective Function Value Convergence Curves for Six Algorithms

结合图4可知，IDOA-ISDT在迭代初期便展现出最快的收敛速度，约500次迭代内，其目标函数值已显著低于其他对比算法，并在后续迭代过程中持续保持最低值。DOA-ISDT收敛精度次之，仍明显优于GWO-ISDT、PSO-ISDT、BAS-ISDT及AO-RCA等4种算法。这4种算法在整个迭代周期内收敛速度较慢，最终适应值相对较高。结果表明，IDOA通过引入自适应阶段退出机制，有效避免了DOA的无效迭代，在保持高寻优精度的同时，大幅提升了寻优速度。

5.2.2　光伏并网指令获取及平抑效果分析

基于IDOA-SDT生成的光伏并网功率指令如图5所示，同时与其他3种方法的输出结果进行对比。各策略下的光伏并网功率波动率见图6，具体评价指标对比见表2。

由图5和图6可知，相较于其他对比策略，本文IDOA-ISDT方法对应的光伏并网功率波动率降幅最大，平均并网波动率仅为0.0021，较其余算法均值降低33%；且本文策略与DOA-ISDT调整后的

最大波动率均小于0.01，这表明两者均可有效平抑光伏功率波动，满足光伏并网技术要求。同时，IDOA-ISDT整体的光伏波动率更低，平抑效果更优。进一步分析图5可知，本策略较DOA-ISDT可以灵活调整平抑强度，避免波动率突变对平抑算法的影响，进一步降低了光伏并网功率波动率。综上，本策略在有效削减光伏并网波动率的同时，灵活性较高，利于光伏电站参与电网调度。

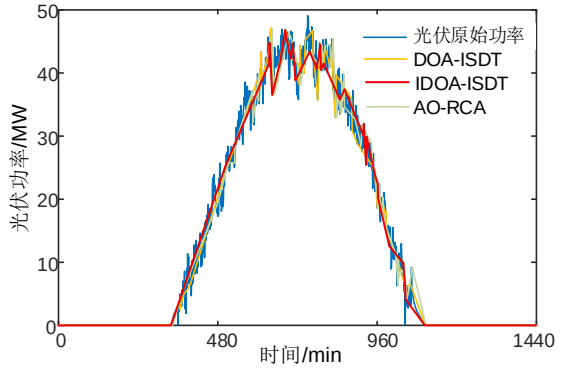


图5 光伏并网指令结果对比

Fig. 5 Comparison of photovoltaic grid connection command results

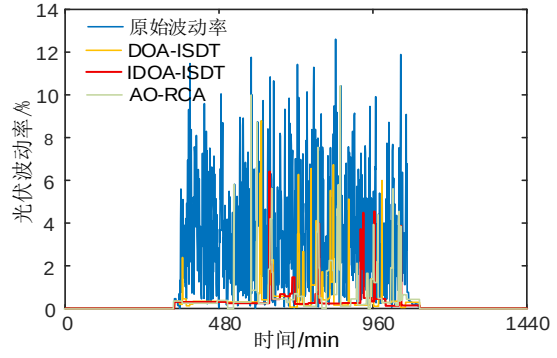


图6 光伏波动率对比

Fig. 6 Comparison of photovoltaic volatility

进一步分析表2可知，相较于DOA-ISDT，IDOA-ISDT的BESS能量吞吐量E_{bess}略有改善，SOC变化偏差ΔS^{c}_{bess}显著降低，平均并网波动率V_{pv}进一步减小，充分体现了自适应阶段退出机制在多目标协调优化方面的优越性。与其他算法相比，IDOA-ISDT在三项指标上均取得最优或次优结果：E_{bess}较最高值降低约16%，可以有效避免BESS过度使用；ΔS^{c}_{bess}较最高值降低约43%，SOC偏差显著降低，有效促进了SOC恢复；V_{pv}较最高值降低约55%，实现了光伏并网功率的高效平抑。

综上，相较于其他对比策略，所提IDOA-ISDT算法在降低并网波动率、促进SOC恢复与减少BESS能量吞吐等方面具有更大优势，为后续均衡分组功率分配策略提供了高质量的并网功率指令基础。

表2 各策略的平抑结果对比

Table 2 Comparison of Stabilization Results of Various Strategies

策略	E_{bess}/MWh	ΔS^{c}_{bess}	V_{pv}/MW
AOA-ISDT	21.547	0.099	0.0040
PSO-ISDT	25.623	0.100	0.0047
BAS-ISDT	22.015	0.027	0.0034
AO-RCA	21.478	0.099	0.0036
DOA-ISDT	21.046	0.070	0.0028
IDOA-ISDT	21.450	0.057	0.0021

5.3 SOC估计误差修正结果及分析

本文采用牛津电池老化数据集[28]对所提SOC估计误差修正方法进行验证。该数据集记录8块Kokam公司生产的钴酸锂离子电池（型号SLPB533459H4，额定容量740mAh）的老化测试数据。本文选取其中3号电池的循环充放电数据作为样本，按照图2所示流程进行SOC估计与修正，结果如图7所示。

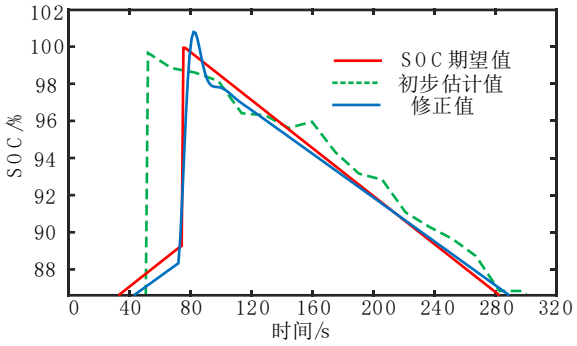


图7 电池单元误差修正结果

Fig. 7 Battery cell SOC error correction results

由图7可见，经本文方法修正后，SOC估计值更接近期望值。定量计算结果表明，修正后的误差评价指标RMSE与MAE分别降低了1.47%和2.05%，验证了所提SOC估计误差值修正方法的有效性，能够显著提升SOC估计精度，为后续BESS电池组精确功率分配奠定了良好基础。

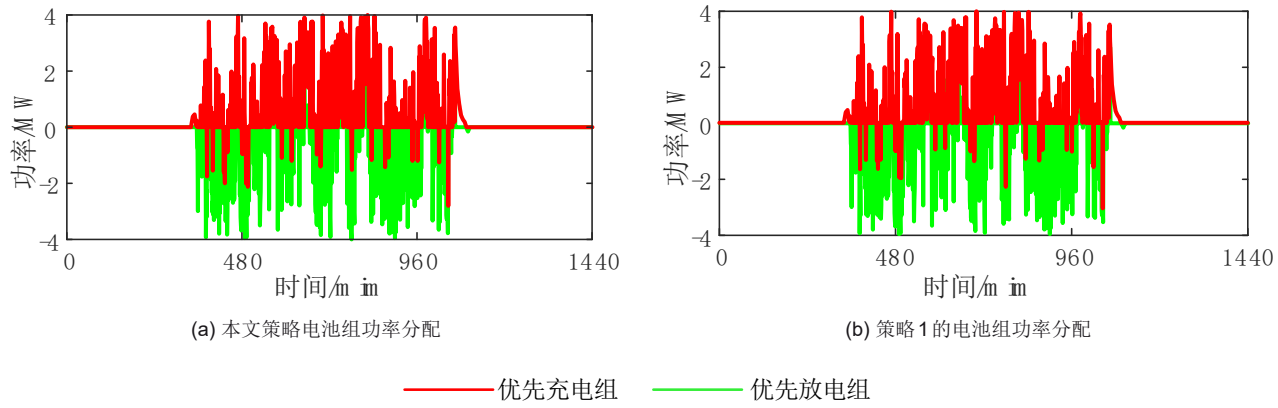
5.4　BESS功率分配效果分析

5.4.1　电池组功率分配结果分析

（1）电池组SOC及功率分配结果分析

为验证所提SOC估计误差修正对电池组功率分配精度的提升作用，本小节对比了误差修正前后的电池组功率分配响应结果，如图8所示。由图8可知，本文策略通过修正单体SOC估计值并据此重新划分功能组，改变了各电池组承担的功率，显著提升了功率分配的准确性，有效避免了因SOC估计误差导致分组不当引发的功率分配偏差问题。反观策略1，该策略未修正SOC致使电池组功率分配出现明显偏差，优先充电组承担了过量的放电指令，不利于BESS等效循环强度的降低。

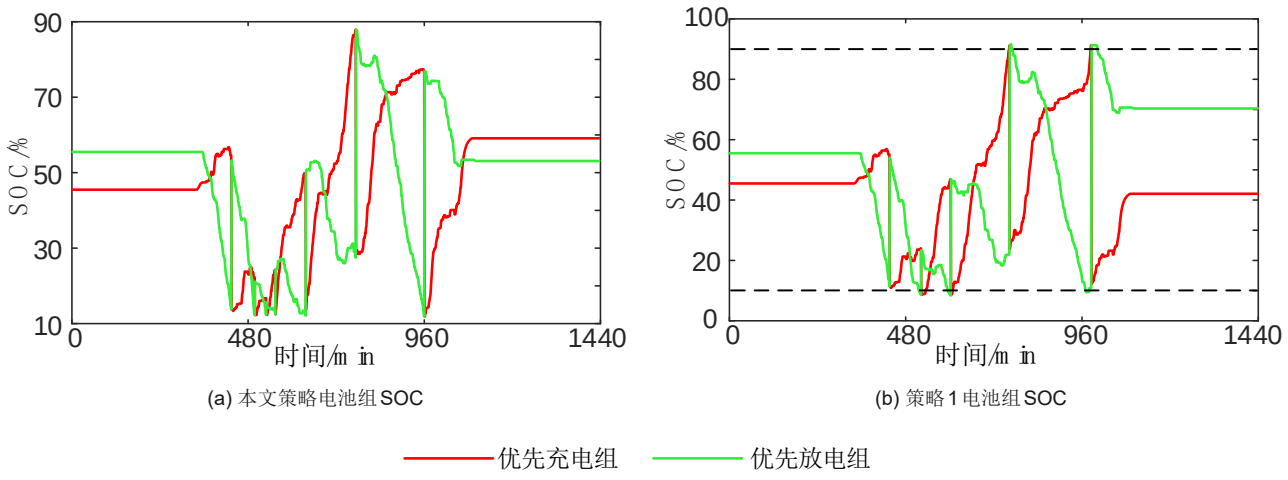
图9进一步对比了本文策略与策略1下电池组SOC的变化趋势。由图9可见，本文策略通过引入SOC估计误差修正机制，有效避免了电池组在运行过程中的SOC越限现象，确保了两电池组的SOC始终处于安全运行区间。而策略1因未考虑SOC估计误差，部分BU的实际SOC与估计值偏差较大，错误的分组方式导致电池组面临SOC超出运行上下限的风险。



(a) 本文策略电池组功率分配　(b) 策略1的电池组功率分配

图8　电池组功率分配结果对比

Fig. 8　Charge and discharge group power distribution



(a) 本文策略电池组SOC　(b) 策略1电池组SOC

图9　电池组SOC变化结果对比

Fig.9　Comparison of SOC change results of battery packs

（2）充放电转换次数及等效循环强度结果

为验证所提策略在降低充放电转换次数及等效循环强度方面的优越性，本小节统计了不同分组策略下BU的充放电转换次数。结果显示，本文策略的充放电转换次数仅为124次，而对比策略1、策略2、策略3的转换次数分别为350次、420次、

400次。结果表明，本文所提基于最少运行单元的梯次运行机制，有效减少了参与功率分配的BU数量，大幅降低了系统整体充放电转换次数。在此基础上，本文基于文献[6]的方法统计了不同策略下BESS的等效循环强度，结果如图10所示。由图10可知，相较于未分组的策略4，所有分组功率分配（策略0-3）均能降低循环次数。不过相较于策略1-3，本文策略通过准确的SOC修正与最少运行单元梯次机制，减少参与参与功率分配的BU数量，使等效循环强度进一步降低约4%。由此可见，本文所提分组功率分配策略通过优化BU动作逻辑，减少了不必要的充放电转换，有效降低了BESS的等效循环强度。

5.4.2 BU功率分配结果分析

各BU的功率分配结果及SOC变化趋势分别如图11、图12所示。由图11可见，本文策略下各BU的输出功率均未超出最大功率限值，满足系统安全运行约束；差异化的功率分配为提升整体SOC一致性奠定了基础。

由图12a可知，本文策略可显著促进电池组内的SOC均衡，所有BU的SOC始终维持在安全运行区间内，未出现SOC越限。相比之下，图12b所示策略1，由于未考虑SOC估计误差修正，BU的SOC均衡提升速度较慢，存在SOC越限风险；同时，由于SOC估计误差，各BU实际承担的功率并非促进SOC均衡的最佳功率，削弱了SOC均衡效果。这种次优的功率也会随着时间累积，无法保证各BU的SOC按计划恢复到0.5附近，不利于BESS的可持续调度。上述结果充分表明，本文所提策略有效促进了BU的SOC均衡与SOC恢复，同时规避了SOC越限风险。

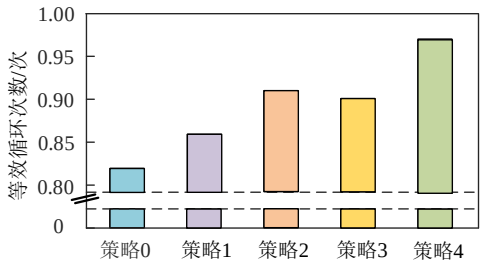


图10 各策略的等效循环次数对比

Fig. 10 Comparison of equivalent cycle numbers for each strategy

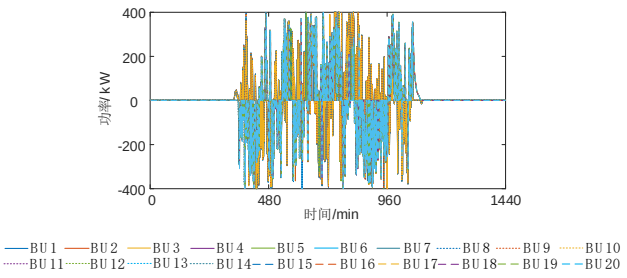
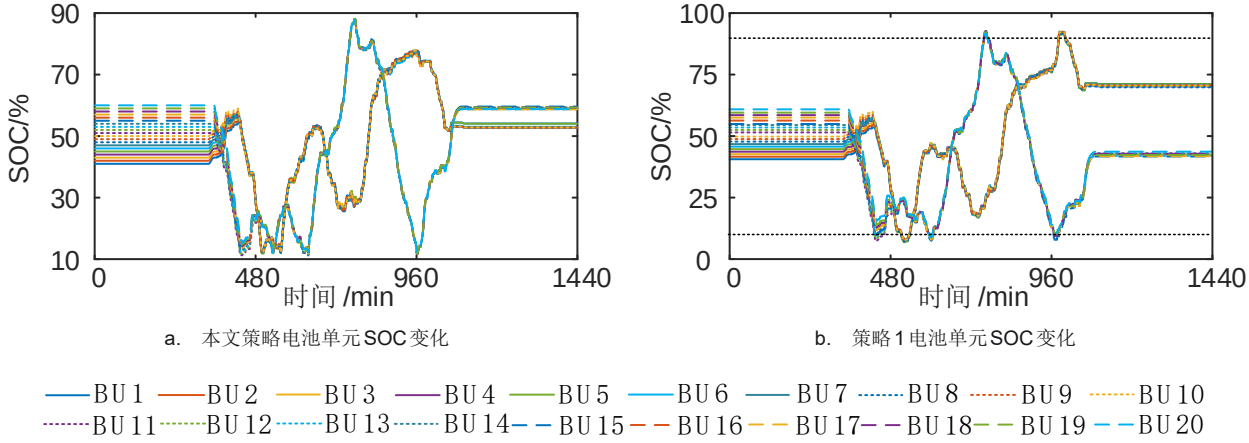


图11 BU功率分配结果

Fig 11 BU power distribution results



a. 本文策略电池单元SOC变化

b. 策略1电池单元SOC变化

图12 各BU的SOC变化

Fig. 12 SOC change for each BU

5.4.3 BESS功率跟踪结果分析

本文最后验证了BESS的功率跟踪性能，结果如图13所示。分析图13可知，本文所提策略下BESS输出功率对参考功率的跟踪精度达到100%，

未产生跟踪误差。这一结果既保障了光伏功率波动平抑目标的高效实现，也进一步验证了所提策略在降低BESS充放电转换次数与等效循环强度、避免SOC越限、提升SOC均衡度的同时，并未牺牲BESS的功率跟踪精度，为光伏并网功率的平稳控制与BESS的安全稳定运行提供了可靠保障，实现了BESS对参考功率的精准动态跟随。

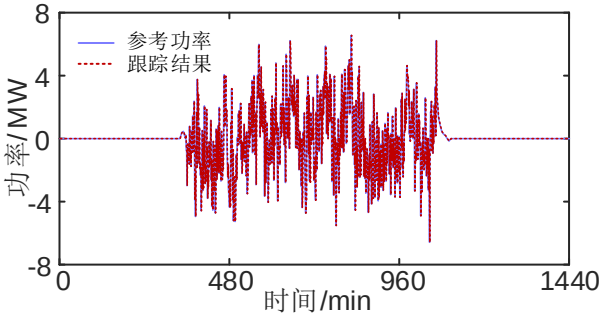


图13　BESS功率跟踪效果

Fig. 13　BESS power tracking effect

6　结论与展望

针对BESS在平抑光伏功率波动过程时面临的等效循环强度大、SOC易越限、单元间均衡度弱的难题，本文提出了考虑SOC估计误差修正的BESS分组梯次功率分配策略，主要结论如下：

（1）所提基于IDOA-ISDT的光伏并网功率指令获取方法有效协同了波动平抑、SOC恢复与能量吞吐等多重目标。相较于多种主流对比算法，该方法在显著降低并网功率波动率的同时，将BESS能量吞吐量降低了16%，SOC恢复偏差降低约43%，为实现BESS经济、可靠运行提供了高质量的功率指令基础。

（2）所提考虑SOC估计误差修正的BESS分组方法提升了运行安全性与分组准确性。该方法将SOC估计误差降低了约1.4%，有效避免了因估计不准导致的“分组失准”问题，确保了电池组在切换过程中SOC始终处于安全运行区间，从而提升了BESS的整体运行安全性。

（3）所提基于最少运行单元的电池组梯次功率分配策略显著降低了系统损耗并促进了SOC均衡。该策略使BESS的等效循环强度进一步降低约4%，并有效促进了所有BU的SOC均衡与恢复，提升了BESS的可持续调度能力。

本文所提策略主要聚焦于BESS的运行性能优化，未考虑全生命周期运行的经济性，未来可计及运行收益进一步完善所提方法。

参 考 文 献

[1] 张媛一,刘震宇,孟继军,等.分布式光伏储能系统的优化配置与运行控制研究[J].储能科学与技术,2025,14(10):3917-3919.
Zhang Yuanyi, Liu Zhenyu, Meng Jijun, et al. Research on the optimal configuration and operation control of distributed photovoltaic energy storage systems[J]. Energy storage science and technology, 2025, 14(10): 3917-3919.

[2] 国家能源局.国家能源局举行新闻发布会[EB/OL].https://www.nea.gov.cn/20251031/7be6728f6d8a48a4955a24a45013b37f/c.html.
National Energy Administration. Press Conference Held by the National Energy Administration[EB/OL].

[3] 庄坤,范鹏程,姜晨宇,等.含分布式光储系统的农灌园区的用电策略优化[J].储能科学与技术,2025,14(7):2782-2790.
Zhuang Kun, Fan Pengcheng, Jiang Chenyu, et al. Optimization of the electricity consumption strategy for agricultural irrigation districts with distributed photovoltaic and energy storage systems [J]. Energy storage science and technology, 2025, 14(7): 2782-2790.

[4] 王于波,郝玲,徐飞,等.分布式光伏集群发电功率波动模式识别与超短期概率预测[J].上海交通大学学报,2024,58(9):1334-1343.
Wang Yubo, Hao Ling, Xu Fei, et al. Pattern recognition and ultra-short-term probabilistic forecasting of power fluctuating in aggregated distributed photovoltaics clusters[J]. Journal of shang hai jiao tong university, 2024, 58(9): 1334-1343.

[5] 杨蒙蒙,邓三星,赵志峥.光伏发电系统与储能装置的协调运行[J].储能科学与技术,2025,14(10):3920-3922.
Yang Mengmeng, Deng Sanxing, Zhao Zhizheng. Coordinated operation of photovoltaic power generation system and energy storage device [J]. Energy storage science and technology, 2025, 14(10): 3920-3922.

[6] 孙浩男,杜鹏,刘念,等.大规模风光储场站群功率跟踪优化控制实时仿真[J].电力建设,2024,45(8):62-74.
Sun Haonan, Du Peng, Liu Nian. et al. Real-time simulation of optimal power tracking control for large-scale wind-photovoltaic-storage power station clusters[J]. Electric power construction, 2024, 45(8): 62-74.

[7] Zhang Jing, Long Benjin, He Yu, et al. Grouping consistency control strategy based on DMPC and energy storage unit constraints [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2023, 148: 108958.

[8] 张小莲,覃世球,陈冲,等.考虑储能充放电均衡度的风储联合调频控制策略[J].电网技术,2024,48(5):1938-1946.
Zhang Xiaolian, Qin Shiqiu, Chen Chong et al. Wind turbine storage joint frequency modulation control strategy considering the balance of energy storage charge and discharge [J]. Power system technology, 2024, 48(5): 1938-1946.

[9] 余洋,霍宇航,吴千,等.考虑使用寿命延长的电池储能平抑光伏分组

功率分配方法[J]. 电网与清洁能源,2025,41(9):83-94.
Yu Yang, Huo Yuhang, Wu Qian, et al. A grouping power distribution method of battery energy storage system to suppress photovoltaic power considering service life extension[J]. Power system and clean energy, 2025, 41(9): 83-94.

[10] 霍俊达,王毅,孟建辉. 基于A-MPC的MMC-HESS平抑光伏功率波动优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(8):48-59.
Huo Junda, Wang Yi, Meng Jianhui, et al. Optimization strategy of MMC-HESS based on A-MPC to stabilize photovoltaic power fluctuation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(8): 48-59.

[11] 李晓宇. 高渗透率光伏功率的波动平抑与储能优化配置研究[D]. 济南:山东大学,2020.

[12] Yu Yang, Cheng Dongyang, Wang Boxiao, et al. Control scheme to extend lifetime of BESS for assisting wind farm to track power generation plan based on wind power feature extraction [J]. IET power electronics, 2022, 15(15): 1629-1651.

[13] 马伟. 含高渗透率光伏的配电网电压协调控制方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.

[14] Yu Yang, Chen Dongyang, Wu Yuwei, et al., Dynamic grouping control of BESS for remaining useful life extension and overall energy efficiency improvement in smoothing wind power fluctuations [J]. CSEE Journal of power and energy systems, 2025, 11(3): 1141-1153.

[15] 余洋,王卜潇,吴玉威,等. 面向光伏平抑考虑SOH与SOC的电池储能系统功率分配方法[J]. 太阳能学报,2024,45(3):377-388.
Yu Yang, Wang Boxiao, Wu Yuwei, et al. Power distribution method of battery energy storage system for photovoltaic power suppression considering SOH and SOC[J]. Acta Energiaesolaris Sinical, 2024,45(3):377-388.

[16] 张小莲,陈冲,张仰飞,等. 考虑充放电不平衡的风电功率平滑电池分组控制[J]. 控制理论与应用,2022,39(3):449-458.
Zhang Xiaolian, Chen Chong, Zhang Yangfei, et al. Battery grouping control for wind power smoothing considering unbalanced charging and discharging[J]. Control theory & applications, 2022, 39(3): 449-458.

[17] 严干贵,蔡长兴,段双明,等. 考虑电池储能单元分组优化的微电网运行控制策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(23):38-46.
Yan Gangui, Cai Changxing, Duan Shuangming, et al. Operation control strategy of microgrid considering grouping optimization of battery energy storage units [J]. Automation of electronic power system, 2020, 44(23): 38-46.

[18] Lin Xinyou, Xi Longliang, Wang Zhaorui. Battery degradation-aware energy management strategy with driving pattern severity factor feedback correction algorithm[J]. Journal of cleaner production, 2024, 450: 141969.

[19] Yu Yang, Wang Boxiao, Li Menglu, et al. Distributed balanced grouping power control for battery energy storage systems to mitigate adjustable capacity discrepancy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(4): 3045-3058.

[20] Lin L, Jia Y, Ma M, et al. Long-term stable operation control method of dual-battery energy storage system for smoothing wind power fluctuations[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 129: 106878.

[21] 蔡新雷,董锴,孟子杰,等. 基于优化动态分组技术的电池储能电站跟踪AGC指令控制策略[J]. 储能科学与技术,2022,11(5):1475-1481.
Cai Xinlei, Dong Kai, Meng Zijie. AGC command tracking control strategy for battery energy storage power station based on optimized dynamic grouping technology [J]. Energy storage science and technology, 2022, 11(5):1475-1481.

[22] 余洋,王卜潇,陈晓,等. 基于改进分组的异质性电池储能系统固定时间比例控制[J]. 电工技术学报,2025,40(21):7092-7106.
Yu Yang, Wang Boxiao, Chen Xiao, et al. Fixed-Time Proportional Control for Heterogeneous Battery Energy Storage Systems Based on Improved Grouping[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2025, 40(21): 7092-7106.

[23] Lang Yifan, Gao Yuelin. Dream Optimization Algorithm (DOA): A novel metaheuristic optimization algorithm inspired by human dreams and its applications to real-world engineering problems [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2025, 436: 117718.

[24] 邱臣铭,王群京,谢芳,等. 基于XGBoost的电动汽车用异步电机全工况及高精度的电流预测方法研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(S1):313-322.
Qiu Chengming, Wang Qunjing, Xie Fang, et al. Prediction method of full-condition and high-precision current of asynchronous motors for electric vehicles based on XGBoost[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 313-322.

[25] 庞辉,郭龙,武龙星,等. 考虑环境温度影响的锂离子电池改进双极化模型及其荷电状态估算[J]. 电工技术学报,2021,36(10):2178-2189.
Pang Hui, Guo Long, Wu Longxing, et al. An improved dual polarization model of Li-ion battery and its state of charge estimation considering ambient temperature[J]. Transactions of china electrotechnical society, 2021, 36(10): 2178-2189.

[26] 卫志农,原康康,成乐祥,等. 基于多新息最小二乘算法的锂电池参数辨识[J]. 电力系统自动化,2019,43(15):139-145.
Wei Zhinong, Yuan Kangkang, Cheng Lexiang, et al. Parameter identification of lithium-ion battery based on multi-innovation least squares algorithm[J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(15):139-145.

[27] 王明东,周政宇,杨宏杰,等. 考虑光伏预测误差和并网波动率的储能容量配置[J]. 郑州大学学报(工学版),2025,46(6):75-83+111.
Wang Mingdong, Zhou Zhengyu, Yang Hongjie, et al. Consideration of Dual-layer Hybrid Energy Storage Capacity Configuration Accounting for Photovoltaic Forecasting Errors and Grid Fluctuation Rates[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(6):75-83+111.

[28] Birkl, C. Diagnosis and prognosis of degradation in lithium-ion batteries[D]. ,Oxford: University of Oxford,, UK, 2017.