

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230897

光伏波动平抑下改进 K-means 的电池储能动态分组控制策略

余洋^{1,2}, 陆文韬^{1,2}, 陈东阳^{1,2}, 刘霖^{1,2}, 夏雨星^{1,2}, 郑晓明³

(1. 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; 2. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学(保定)), 河北 保定 071003; 3. 国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原 030001)

摘要: 针对电池储能系统(battery energy storage system, BESS)进行光伏波动平抑时寿命损耗高及荷电状态(state of charge, SOC)一致性差的问题, 提出了光伏波动平抑下改进 K-means 的 BESS 动态分组控制策略。首先, 采用最小-最大调度方法获取光伏并网指令。其次, 设计了改进侏儒猫鼬优化算法(improved dwarf mongoose optimizer, IDMO), 并利用它对传统 K-means 聚类算法进行改进, 加快了聚类速度。接着, 制定了电池单元动态分组原则, 并根据电池单元 SOC 利用改进 K-means 将其分为 3 个电池组。然后, 设计了基于充放电函数的电池单元 SOC 一致性功率分配方法, 并据此提出 BESS 双层功率分配策略, 上层确定电池组充放电顺序及指令, 下层计算电池单元充放电指令。对所提策略进行仿真验证, 结果表明, 所设计的 IDMO 具有更高的寻优精度及更快的寻优速度。所提 BESS 平抑光伏波动策略在有效平抑波动的同时, 降低了 BESS 运行寿命损耗并提高了电池单元 SOC 的均衡性。

关键词: 电池储能系统; 波动平抑; 功率分配; 改进侏儒猫鼬优化算法; 改进 K-means 聚类算法

Dynamic grouping control strategy for battery energy storage based on improved K-means under photovoltaic fluctuation suppression

YU Yang^{1,2}, LU Wentao^{1,2}, CHEN Dongyang^{1,2}, LIU Mai^{1,2}, XIA Yuxing^{1,2}, ZHENG Xiaoming³

(1. State Key Laboratory of New Energy and Electric Power Systems (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 3. State Grid Shanxi Economic and Technological Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: To address the issues of high lifespan loss and poor state of charge (SOC) consistency during photovoltaic fluctuation suppression in a battery energy storage system (BESS), an improved K-means dynamic grouping control strategy for BESS under photovoltaic fluctuation suppression is proposed. First, the minimum-maximum scheduling method is used to obtain photovoltaic grid connection instructions. Secondly, an improved dwarf mongoose optimizer (IDMO) is designed and used to improve the traditional K-means clustering algorithm, accelerating the clustering speed. Next, the principle of dynamic grouping of battery cells is formulated, and based on the improved K-means of SOC of battery cells, they are divided into three battery groups. Then, a battery cell SOC consistent power distribution method based on the charge and discharge function is designed, and a BESS two-layer power distribution strategy is proposed. The upper layer determines the charge and discharge order and instructions of the battery pack, and the lower layer calculates the charge and discharge instructions of the battery cell. The proposed strategy is simulated and verified, and the results show that the designed IDMO has higher optimization accuracy and faster optimization. The proposed BESS strategy for suppressing photovoltaic fluctuations effectively suppressed fluctuations while reducing BESS operating life loss and improving the balance of the battery cell SOC.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFE0122200).

Key words: battery energy storage system; fluctuation suppression; power distribution; improved dwarf mongoose optimization algorithm; improved K-means clustering algorithm

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFE0122200); 国家自然科学基金项目资助(52077078)

0 引言

为实现“十四五”提出的新能源高质量跃升发展的目标,我国正大力推动以光伏发电为代表的大规模新能源接入电网,然而光伏发电的波动性以及强随机性给并网型光伏电站的安全入网造成阻碍^[1-4]。电池储能系统(battery energy storage system, BESS)具备响应速度快、可对电能进行时空平移和功率方向灵活等特性,为解决平抑光伏波动、实现安全可靠并网提供了有效的解决方案^[5-9]。

众多学者对 BESS 平抑光伏波动的方法开展研究。文献[10-11]提出小波包分解的方法,将光伏出力分解为高频和低频分量,分配 BESS 的充放电指令最终完成波动平抑。文献[12]使用经验模态分解法对光伏出力进行分解,并根据其固有模态函数分量进行低频分量的选择以及功率指令分配。文献[13]提出一种基于模糊控制的 BESS 平抑风光波动的方法。以上方法均能有效地平抑光伏并网功率波动,但存在电池单元频繁进行充放电状态切换导致的寿命损耗过高问题。

为降低 BESS 运行寿命损耗,研究者提出众多 BESS 运行策略。文献[14]提出 BESS 进行浅循环充放电的整组运行策略,虽在一定程度上降低了 BESS 运行寿命损耗,但降低程度有限。为进一步降低 BESS 运行寿命损耗,使用尽可能少的电池单元参与响应是一种有效的解决途径。因此许多研究采用了 BESS 的双层功率分配策略,例如文献[15]提出了 BESS 的双层功率分配方法,并通过充放电组不完全分离的分组模式有效地降低了寿命损耗,但并未讨论电池组容量优化问题。文献[16]将 BESS 分为充/放电组,根据电池单元的荷电状态(state of charge, SOC)严格规定电池单元所属组别进行指令跟踪,虽减少了充放电状态转换的次数,但牺牲了 BESS 调控的灵活性,因此需要配置的 BESS 容量较高,加大了容量配置成本。文献[17]通过先分电池组再分电池簇的方法令 BESS 参与响应,有效降低了 BESS 运行寿命损耗。但以上方法在进行分组以及功率分配时并未计及 BESS 内电池单元 SOC 一致性问题,无法保证 BESS 具备良好的可持续响应能力^[18]。

研究者针对 SOC 一致性保持方法提出众多策略。文献[19]提出一种基于 SOC 一致性理论的功率自适应协调控制策略,初步实现了储能系统 SOC 的均衡。文献[20]提出 BESS 双层调控策略,针对下层设计基于下垂控制的电池单元功率分配方法,降低了电池 SOC 的极差,保证了 SOC 一致性。以上两种方法虽能有效均衡 SOC,但耗时较长。文献[21]

提出基于 BESS 二分法的双层功率分配策略,设计表征电池单元充放电能力的充放电函数以实现 SOC 一致性,但该方法对充放电函数依赖性较大,下层指令分配易产生超限等问题。文献[22]提出动态分组法功率分配策略,但其分组采用的是基于公式的阈值分组,人为制定的分组策略易导致分类不准确的问题。可见, BESS 分组及双层功率分配策略有待进一步改进。

为了实现在 BESS 寿命损耗缩减效果的同时保持 BESS 具备良好的可持续响应能力,本文设计了光伏波动平抑下基于改进 K-means 的电池储能动态分组控制策略。首先,利用最小-最大调度原则获取光伏并网指令;其次,针对侏儒猫鼬优化算法(dwarf mongoose optimizer, DMO)寻优精度低及寻优时间长的不足,提出了改进的侏儒猫鼬寻优算法(improved dwarf mongoose optimizer, IDMO);接着,提出了基于 IDMO 的改进 K-means 聚类算法(简称 IDMO-KM 算法)以减少聚类所需时间,制定了动态分组触发机制以及动态分组原则,使用 IDMO-KM 算法将 BESS 的所有电池单元自动聚类,划分为 3 个电池组:优先充电组(priority charging group, PCG)、优先放电组(priority discharging group, PDG)和后备支援组(backup group, BG);然后,设计了 BESS 双层充放电功率分配策略,上层功率分配策略确定了电池组响应顺序和充放电指令,同时下层设计了表征电池单元充放电能力的充放电函数以保证指令响应过程中 BESS 的 SOC 一致性;最后,对光伏功率进行仿真,结果表明,本文所提的 BESS 平抑光伏波动策略能够有效降低波动率,相较其他控制策略,本文提出的控制策略在降低 BESS 运行寿命方面最为有效,且调控前后 BESS 整体 SOC 一致性维持更优。

1 BESS 平抑光伏波动及功率分配流程

本研究设计的光伏波动平抑下改进 K-means 的 BESS 动态分组控制策略流程如图 1 所示。其具体实现过程如下。

1) 光伏并网指令获取。为减少电池单元充放电状态切换次数以有效降低 BESS 整体运行寿命损耗,针对光伏电站采集的功率数据,本研究采用最小-最大调度原则获取光伏并网指令。

2) 电池单元动态分组。首先,针对 DMO 算法存在寻优精度低、寻优时间长的不足,提出了 IDMO 算法,有效提高了寻优精度以及寻优速度;其次,针对传统 K-means 聚类算法存在寻找聚类中心所需执行时间较长及对聚类中心依赖性高的不足,提出了 IDMO-KM 算法。在此基础上,根据 SOC 将 BESS

的电池单元划分为 3 个电池组: PCG、PDG 和 BG。

3) BESS 双层功率分配。首先, 根据 BESS 在下一时刻需要进行的充放电状态选取光伏并网功率指令, 并计算 BESS 的充放电指令; 其次, 确定 3 个电池组的动作顺序及其应承担的充放电指令, 实现储能上层功率分配; 然后, 设计表征电池单元充放电能力强弱的充放电函数, 并基于此设计了 SOC 一致性功率分配原则, 将每个电池组的充放电指令分配给其内的电池单元; 最后, 电池单元对分配到的充放电指令分别进行响应。

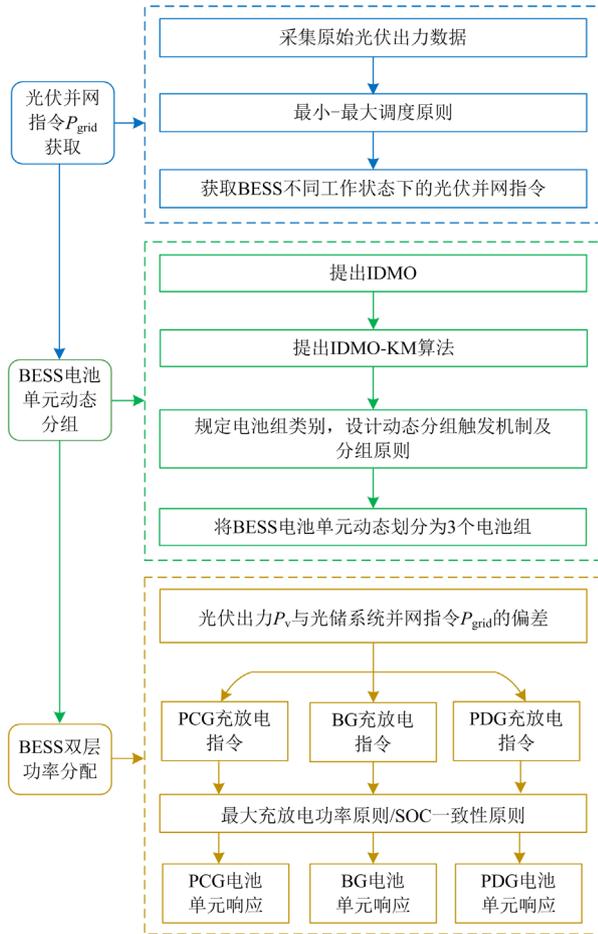


图 1 本文策略流程图

Fig. 1 Strategy flowchart of this paper

2 光伏并网指令获取

在获取平稳的光伏并网指令以降低并网功率波动的前提下, 为减少 BESS 充放电状态切换次数以保证 BESS 在一个调度间隔内不会进行充放电状态转换, 采用文献[23]提出的最小-最大调度原则获取光伏电站的并网功率指令, 其原理如图 2 所示。其中 ΔT 为 BESS 一个调度周期的时间。

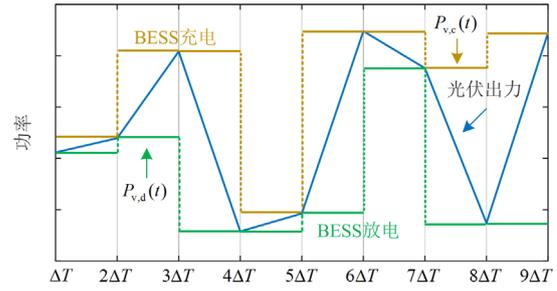


图 2 最小-最大调度原则示意图

Fig. 2 Schematic diagram of minimum-maximum scheduling principle

若 BESS 在下一个调度周期需要工作于充电状态, 则选取下一个调度周期内光伏出力 P_v 的最小值作为光伏并网指令; 若 BESS 在下一个调度周期需要工作于放电状态, 则选取下一个调度周期内光伏出力 P_v 的最大值作为光伏并网指令。最小-最大调度原则表达式为

$$\begin{cases} P_{v,c}^i(t) = \min_{t_i < t < t_i + \Delta T} \{P_v(t)\}, \text{ 充电} \\ P_{v,d}^i(t) = \max_{t_i < t < t_i + \Delta T} \{P_v(t)\}, \text{ 放电} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{v,c}^i(t)$ 为第 i 个调度周期中 BESS 在 t 时刻处在充电状态的光伏并网指令; $P_{v,d}^i(t)$ 为第 i 个调度周期中 BESS 在 t 时刻处在放电状态的光伏并网指令; t_i 为第 i 个调度周期间隔的起始时刻; $P_v(t)$ 为 t 时刻的光伏出力。

3 IDMO 改进 K-means 的电池单元动态分组

3.1 IDMO 算法

3.1.1 DMO 算法基本原理

DMO 算法是文献[24]提出的一种模拟侏儒猫鼬种群半游牧行为的元启发式算法。侏儒猫鼬族群处于母系社会状态, 共有 3 类职能群体: 阿尔法组、侦察组以及保姆组。DMO 算法描述了由阿尔法组与保姆组组成的侏儒猫鼬群体觅食、寻找睡眠丘以及进行保姆组交换的行为过程。DMO 算法的基本原理如下。

1) 种群初始化

首先, 初始化侏儒猫鼬个体所在位置 X 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,d} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为种群规模; d 为变量维度; $x_{i,j}$ 为第 i 个搜索个体在第 j 个维度的位置, $i=1,2,\dots,n$, $j=1,2,\dots,d$ 。

2) 阿尔法组雌性首领产生

阿尔法组雌性个体成为首领的概率 α 如式(3)所示。

$$\alpha = g_i / \sum_{i=1}^n g_i \quad (3)$$

式中, g_i 为第 i 个雌性个体的适应度函数值。

3) 阿尔法组觅食

初始睡眠丘位置设定为固定值, 阿尔法组成员共同行动进行觅食行为, 其位置更新公式如式(4)所示。

$$X_{i+1} = X_i + p_{hi} \times p_{cep} \quad (4)$$

式中: X_{i+1} 为更新后阿尔法组成员位置; X_i 为更新前阿尔法组成员位置; p_{hi} 为服从均匀分布的随机数, $p_{hi} \in [-1, 1]$; p_{cep} 为首领带领阿尔法组成员觅食的移动步长, 默认取值为 2。

4) 睡眠丘值及平均值计算

每次迭代后都会产生睡眠丘值 s_i , 如式(5)所示。

$$s_i = \frac{g_{i+1} - g_i}{\max\{g_{i+1}, g_i\}} \quad (5)$$

所发现的睡眠丘平均值 φ 的计算公式为

$$\varphi = \sum_{i=1}^n s_i / n \quad (6)$$

5) 保姆组交换

当阿尔法组无法搜寻到新的食物源时, 判定阿尔法组觅食能力不足, 触发保姆交换条件, 此时需将阿尔法组与保姆组成员进行交换, 阿尔法组同时进行觅食行为和寻找睡眠丘行为, 确定保姆组交换后种群个体的位置公式如式(7)所示。

$$X_c = l_b + r_c \times (u_b - l_b) \quad (7)$$

式中: X_c 为保姆组交换后寻优个体所在位置; r_c 为服从均匀分布的随机数, $r_c \in [0, 1]$; u_b 与 l_b 分别为决策变量的上下限值。

6) 新睡眠丘搜寻

为避免食物资源过度采集, 在满足保姆交换条件后侏儒猫鼬种群不再返回上一个睡眠丘, 而是进行新的睡眠丘探索, 寻找新睡眠丘的表达式如式(8)所示。

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i - C_F \cdot p_{hi} \cdot r_c \cdot [X_i - \vec{M}] & \varphi_{i+1} > \varphi_i \\ X_i + C_F \cdot p_{hi} \cdot r_c \cdot [X_i - \vec{M}] & \varphi_{i+1} \leq \varphi_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_F 表征侏儒猫鼬种群移动能力; \vec{M} 为侏儒猫鼬集群向新睡眠丘移动的方向向量; φ_i 为 i 时刻睡眠丘位置。 C_F 与 \vec{M} 的表达式分别如式(9)和式

(10)所示。

$$C_F = \left(1 - \frac{I_t}{I_{t,max}}\right)^{\left(2 \times \frac{I_t}{I_{t,max}}\right)} \quad (9)$$

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i \times s_i}{X_i} \quad (10)$$

式中: I_t 为当前迭代次数; $I_{t,max}$ 为最大迭代次数。

3.1.2 IDMO 算法基本原理

1) 设计可变步长 p_{cep}

阿尔法组雌性首领带领成员觅食过程中的移动步长 p_{cep} 是影响 DMO 算法寻优精度的关键因素, DMO 算法中 p_{cep} 默认取值为 2, 但步长过大易造成优化问题难以收敛, 同时有可能跳过全局最优解, 导致寻优精度低。为解决此问题, 本文设计了改进步长 p_{cep} 的方案, 如式(11)所示。

$$p_{cep} = 2 - \frac{I_t}{2I_{t,max}} \quad (11)$$

2) 设计改进的种群移动能力因子

C_F 是影响 DMO 算法寻优速度的关键因素, DMO 算法中的 C_F 设计容易导致迭代初期出现全局搜索慢的问题。为加快侏儒猫鼬的寻优速度, 设计了改进的种群移动能力因子, 如式(12)所示。

$$C_F = 1 - e^{\left(-e^{-0.2(I_t - 0.3I_{t,max})}\right)} \quad (12)$$

3.1.3 IDMO 算法的验证

针对常用的 6 种基准测试函数 $F_1 - F_6$ [25], 选取 IDMO 算法与天牛须优化算法 (beetle antennae search algorithm, BAS)、金鹰优化算法 (golden eagle optimization, GEO)、白鲸优化算法 (beluga whale optimization, BWO) 进行性能比较, 并选取平均值 (average value, AVE)、均方根误差 (root mean squared error, RMSE)、运行所需时间 (required time, RT) 以及最优结果 (best solution, BS) 作为评价指标。为避免偶然性以保证测试结果的公平性, 将迭代次数设置为 100, 种群规模为 30, 并分别对每个测试函数运行 50 次, 不同优化算法的测试结果如表 1 所示, 其中, 测试函数对应性能最优者用粗体突出显示。

可见, 相比于其他优化算法, 本文提出的 IDMO 算法获取的最优解标准差更低, 具备更强的鲁棒性; 同时, IDMO 算法的运行时间相较其他算法更短, 证明其寻优速度更快; 此外, IDMO 算法的最优解值低于其他优化算法, 验证了 IDMO 算法具备更准确的寻优精度。综上所述, 本文提出的 IDMO 算法在鲁棒性、寻优速度及寻优精度等方面均具备优势。

表 1 算法测试结果比较

Table 1 Test results comparison of the algorithms

优化算法	指标	标准函数计算值					
		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
IDMO	AVE	4.61×10^{-22}	2.69×10^{-16}	3.16×10^{-15}	3.90×10^{-1}	7.31×10^0	7.59×10^{-13}
	RMSE	8.75×10^{-22}	2.07×10^{-18}	4.87×10^{-14}	1.83×10^0	2.11×10^0	2.08×10^{-14}
	RT/s	4.98×10^{-2}	4.73×10^{-2}	6.92×10^{-2}	6.31×10^{-2}	7.15×10^{-2}	1.68×10^{-1}
	BS	4.55×10^{-22}	3.64×10^{-19}	8.43×10^{-16}	1.73×10^{-1}	2.03×10^0	6.30×10^{-14}
DMO	AVE	3.77×10^{-8}	5.62×10^{-11}	7.80×10^{-12}	4.37×10^{-1}	1.93×10^0	3.14×10^0
	RMSE	4.34×10^{-8}	4.73×10^{-12}	5.97×10^{-13}	9.06×10^{-1}	7.34×10^0	2.01×10^{-1}
	RT/s	5.74×10^{-2}	7.58×10^{-2}	7.94×10^{-2}	8.32×10^{-2}	1.46×10^{-1}	1.80×10^{-1}
	BS	7.46×10^{-9}	7.86×10^{-12}	7.60×10^{-13}	6.71×10^{-1}	8.09×10^0	1.52×10^0
BAS	AVE	4.61×10^{-8}	5.19×10^{-6}	6.38×10^{-9}	2.99×10^{-5}	9.76×10^0	8.10×10^0
	RMSE	6.51×10^{-9}	6.62×10^{-6}	4.72×10^{-10}	3.42×10^{-6}	8.58×10^0	1.28×10^0
	RT/s	1.20×10^{-1}	2.04×10^{-1}	8.95×10^{-2}	1.92×10^{-1}	9.33×10^{-2}	3.90×10^{-1}
	BS	1.04×10^{-8}	6.81×10^{-6}	1.40×10^{-9}	2.30×10^{-6}	9.09×10^0	3.42×10^0
GEO	AVE	1.02×10^{-11}	3.06×10^{-8}	6.75×10^{-14}	7.84×10^0	7.20×10^0	6.41×10^0
	RMSE	1.76×10^{-11}	6.27×10^{-6}	3.78×10^{-12}	6.75×10^{-2}	2.96×10^0	1.23×10^0
	RT/s	5.65×10^{-2}	4.94×10^{-2}	7.11×10^{-2}	8.20×10^{-2}	7.46×10^{-2}	3.76×10^{-2}
	BS	6.34×10^{-12}	1.27×10^{-8}	3.06×10^{-14}	8.83×10^{-1}	2.97×10^0	3.50×10^0
BWO	AVE	3.62×10^{-6}	8.32×10^{-3}	5.43×10^{-10}	7.38×10^{-1}	5.28×10^0	6.49×10^{-9}
	RMSE	8.29×10^{-6}	3.54×10^{-4}	2.33×10^{-11}	2.07×10^{-2}	8.63×10^0	3.21×10^{-10}
	RT/s	1.36×10^{-1}	2.36×10^{-1}	7.05×10^{-2}	1.26×10^{-1}	1.26×10^{-1}	2.27×10^0
	BS	5.73×10^{-7}	6.54×10^{-4}	5.61×10^{-12}	2.06×10^{-1}	8.83×10^0	2.83×10^{-10}

3.2 基于 IDMO 的改进 K-means 电池单元分组

3.2.1 IDMO-KM 算法

传统 K-means 聚类算法的目标函数为误差平方和准则函数, 依据函数计算结果判定聚类效果。对于样本空间而言, 样本点在样本空间的分布往往会使得聚类存在局部极小值点, 而 K-means 聚类算法生成初始聚类中心是随机的, 当初始聚类中心生成于局部极小值点周围时, 聚类最终很可能陷入局部最优解而无法达到全局最优解, 可见 K-means 聚类结果的好坏依赖于初始聚类中心生成的结果是否理想。同时传统的 K-means 聚类算法时间复杂度高, 迭代次数、聚类中心数量的增加以及聚类中心生成结果不理想都会造成算法时间的增加。因此传统 K-means 算法在处理数据时综合性能较低。

为有效减少 K-means 算法运算时间的同时保证算法能达到全局最优解, 本文以聚类中心为目标变量, 采用 IDMO 算法进行寻优, 得到 IDMO 算法下最优的聚类中心结果。在利用 IDMO 算法求取聚类中心结果时, 根据最近邻规则进行样本点类型划分, 最近邻规则函数表达式如式(13)所示。

$$E(y_i) = \min \sqrt{\sum_{k=1}^K (y_i - x_k)^2} \quad (13)$$

式中: y_i 为第 i 个样本点; x_k 为第 k 个聚类中心; k 为聚类中心点数量。

根据欧氏距离原理, 本文设计 IDMO-KM 算法的适应度函数为各类样本点到自身聚类中心之和, 其表达式如式(14)所示。

$$f(x_k) = \sum_{k=1}^{N_{KM}} \sum_{i=1}^{n_k} \|x_k - y_{i,k}\| \quad (14)$$

式中: N_{KM} 为类别数; n_k 为第 k 类样本点总数; $y_{i,k}$ 为第 k 类样本中的第 i 个样本点。

为验证本文提出的 IDMO-KM 算法的有效性, 采用 UCI 平台上 3 种典型机器学习数据集进行测试, 选取参数如表 2 所示。

表 2 UCI 数据集

Table 2 UCI dataset

数据集	样本总数	类别数	特征数
Iris	150	3	4
Wine	178	3	13
Wdbc	569	2	30

将 IDMO-KM 算法与传统 K-means 算法以及 DMO-KM 算法进行对比分析, 选取算法迭代次数以及聚类结果准确率作为评价指标以评价各个算法聚类的准确性以及快速性, 最终对比结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 本文提出的 IDMO-KM 算法在准确率以及迭代次数的聚类结果评价中的聚类性能均优于传统 K-means 算法和 DMO-KM 算法, 证明此

算法能有效减少迭代次数，加快收敛速度，提高聚类准确性。

表 3 各聚类算法对比结果

Table 3 Comparison results of various clustering algorithms

聚类算法	准确率/%			迭代次数		
	Iris	Wine	Wdbc	Iris	Wine	Wdbc
IDMO-KM	93.2	79.6	86.7	5	4	9
DMO-KM	90.1	73.9	83.8	6	5	12
K-means	83.5	65.1	79.8	8	7	17

3.2.2 基于 IDMO-KM 算法的 BESS 动态分组策略

基于 3.2.1 节所采用的 IDMO-KM 算法对 BESS 进行聚类，选取聚类中心点数量 $k=3$ ，将 3 个电池组分为 PCG、BG 和 PDG。为降低电池单元运行寿命损耗，应采用尽可能少的单元参与响应，保证 BESS 能较好地进行可持续调控，本文设计了基于 IDMO-KM 算法的电池单元动态分组策略。

1) 动态分组触发机制

为避免 BESS 电池单元深度充放电，本文设计了电池组工作 SOC 上下限阈值触发机制，当 BESS 处于充电状态并存在电池单元 SOC 超过上限阈值的情况时，或当 BESS 处于放电状态并存在电池单元低于下限阈值的情况时，须在下一个调度周期开始时进行重新分组，同时需要将 BESS 原本的工作状态进行转换。本文 SOC 上下限阈值 S_U 和 S_D 表达式如式(15)所示。

$$\begin{cases} S_U = S_{\max} - \Delta S_{\max} \\ S_D = S_{\min} - \Delta S_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中： S_{\max} 和 S_{\min} 分别为储能系统电池单元 SOC 运行上下限； ΔS_{\max} 为电池单元在一个调度周期内以最大充/放电功率运行时 SOC 变化量，其表达式如式(16)所示。

$$\Delta S_{\max} = \begin{cases} \frac{P_{c\max} \cdot \Delta T \cdot \eta_b}{C_b} & \text{充电} \\ \frac{P_{d\max} \cdot \Delta T}{C_b \cdot \eta_b} & \text{放电} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $P_{c\max}$ 和 $P_{d\max}$ 分别为电池单元最大充、放电功率； η_b 为电池单元充放电效率； C_b 为电池单元容量。

在此基础上，为减少单个电池单元出现频繁调节的情况，本文设计了极差阈值触发机制，设置 BESS 电池单元 SOC 极差阈值为 0.2，当 BESS 中电池单元极差超过此阈值时，则需要重新分组。

另外，BESS 若仅触发极差阈值机制，则只需要重新分组，BESS 的工作状态不发生改变；若同时触发电池组工作上下限阈值机制和极差阈值机制，则采取电池组工作上下限阈值机制的对应措施。

2) 动态分组基础原则

对 BESS 内电池单元逐一编号，在动态分组机制触发时，根据 SOC 大小对电池单元进行升序排列，依据 IMDO-KM 算法的聚类结果，依次将 SOC 最低的 N_c 个电池单元划分至 PCG，将 SOC 最高的 N_d 个电池单元划分至 PDG，剩余 N_b 个电池单元划分至 BG。

4 BESS 双层功率分配策略

现有 BESS 双层功率分配策略只能实现降低 BESS 运行过程中的寿命损耗或保证 BESS 拥有良好的可持续调度能力的单一目标。为减少 BESS 运行寿命损耗的同时保持 BESS 良好的可持续调控能力，本研究提出了基于 SOC 一致性原则的 BESS 双层功率分配策略，上层确定 BESS 电池组充放电顺序及指令，下层利用表征电池单元充放电能力的函数完成下层功率分配。

4.1 BESS 上层功率分配

根据第 2 节采用的最小-最大调度原则以及第 3 节提出的动态分组触发机制，可得到最终的光储系统并网指令 P_{grid} 。根据 P_{grid} 确定 BESS 3 个组的动作顺序以及功率分配指令 P_{bess} ，上层电池组指令分配具体方案如表 4 所示。其中， $P_{\max,c}$ 、 $P_{\max,b}$ 和 $P_{\max,d}$ 分别为 PCG、BG 和 PDB 的当前最大充放电功率。

表 4 3 个电池组承担的调节指令

Table 4 Adjustment instructions of three BESS groups

状态	条件	组别		
		PCG	BG	PDG
充电 状态	$P_{\text{bess}} \geq P_{\max,c} + P_{\max,b}$	$P_{\max,c}$	$P_{\max,c}$	$P_{\text{bess}} - P_{\max,c} - P_{\max,b}$
	$P_{\max,c} < P_{\text{bess}} < P_{\max,c} + P_{\max,b}$	$P_{\max,c}$	$P_{\text{bess}} - P_{\max,c}$	0
放电 状态	$P_{\text{bess}} < P_{\max,c}$	P_{bess}	0	0
	$P_{\text{bess}} < P_{\max,c} + P_{\max,b}$	$P_{\text{bess}} - P_{\max,d}$	$P_{\max,d}$	$P_{\max,d}$
充电 状态	$P_{\max,d} + P_{\max,b} < P_{\text{bess}} < P_{\max,d}$	0	$P_{\text{bess}} - P_{\max,d}$	$P_{\max,d}$
	$P_{\text{bess}} \geq P_{\max,d}$	0	0	P_{bess}

上层电池组动作顺序方案如下：

1) $P_{\text{bess}} > 0$ 时，电池组响应顺序为 PCG→BG→PDG，当电池组全部达到最大充电功率或电池组满足功率调节需求时停止响应；

2) $P_{\text{bess}} < 0$ 时，电池组响应顺序为 PDG→BG→PCG，当电池组全部达到最大放电功率或电池组满足功率调节需求时停止响应；

3) $P_{\text{bess}} = 0$ 时, 3 个电池组的充放电指令为 0, 即不进行响应。

4.2 BESS 下层功率分配

电池组获取功率指令后, 需要将其分配至组内每一个电池单元, 本文制定的 BESS 下层功率分配策略包含如下两个原则。

1) 最大充放电功率原则

最大充放电功率原则即当电池组功率分配指令为最大充放电功率时, 电池单元也执行最大充放电功率响应行为。

2) SOC 一致性原则

为保障 BESS 拥有良好的可持续调度能力, 保持良好的 SOC 一致性。设计了 BESS 电池单元充放电函数, 具体表达式如式(17)所示, 不同 SOC 下电池单元的充放电函数曲线如图 3 所示。

$$\begin{cases} f_{\text{ch}}(S_{b,i}(t-1)) = 1 - \frac{1}{2} \times \left(\frac{e^{0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)} - e^{-0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)}}{e^{0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)} + e^{-0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)}} \right) \\ f_{\text{dis}}(S_{b,i}(t-1)) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{e^{0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)} - e^{-0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)}}{e^{0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)} + e^{-0.6 \times (10 \times S_{b,i}(t-1) - 5)}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $f_{\text{ch}}(\cdot)$ 和 $f_{\text{dis}}(\cdot)$ 分别为 BESS 电池单元充、放电函数; $S_{b,i}(t-1)$ 为第 i 个电池单元 $t-1$ 时刻的 SOC。

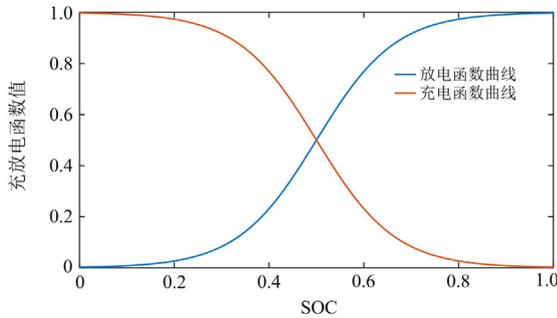


图 3 电池单元充放电函数曲线

Fig. 3 Charging and discharging function curve of battery unit

基于 BESS 电池单元充放电函数, 本文设计了考虑 SOC 一致性的功率分配表达式, 如式(18)所示。

$$\begin{cases} P_{b,i}(t) = \frac{P_{\text{bess}}(t) \cdot f_{\text{ch}}(S_{b,i}(t-1))}{\sum_{i=1}^n f_{\text{ch}}(S_{b,i}(t-1))}, \text{ 充电} \\ P_{b,i}(t) = \frac{P_{\text{bess}}(t) \cdot f_{\text{dis}}(S_{b,i}(t-1))}{\sum_{i=1}^n f_{\text{dis}}(S_{b,i}(t-1))}, \text{ 放电} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{b,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个电池单元分配的充放电指令; $P_{\text{bess}}(t)$ 为 t 时刻电池组的充放电功率指令。

5 仿真验证

5.1 仿真参数设置

本文选取一装机容量为 120 MW 的光伏电站作为研究对象, 其 BESS 配置规模为 20 MW/20 MWh, 选取某日时间尺度为 1 min 的 24 h 光伏实际出力数据进行 BESS 光伏波动平抑仿真验证, 光储系统相关参数如表 5 所示。

表 5 参数设置

Table 5 Parameter settings

参数	数值
调度周期单位时间 $\Delta T/\text{min}$	1
电池单元容量/MWh	0.4
电池单元规模/个	50
最大充放电功率/MW	± 0.4
SOC 运行上限 S_{max}	0.9
SOC 运行下限 S_{min}	0.1
充放电效率 $\eta_b/\%$	90
电池单元初始 SOC 分布	$U[0.3, 0.7]$

5.2 IDMO-KM 算法聚类结果有效性分析

采用 IDMO 算法进行改进 K-means 适应度函数寻优求解, 选取某时刻 IDMO 算法迭代效果与 DMO、BAS、GEO 及 BWO 等 4 种优化算法进行比较, 结果如图 4 所示。可见, 相比于其他 4 种算法, IDMO 算法达到最优解的迭代次数最少, 同时寻优精度也更高。

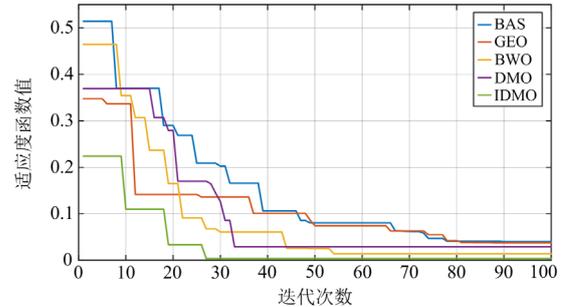


图 4 各优化算法的迭代效果

Fig. 4 Iterative effects of various optimization algorithms

5.3 BESS 上层功率分配

本文设置 BESS 在初始工作时刻处于充电状态, 在触发动态分组机制时, 将电池单元划分至相应的电池组中, 根据 BESS 双层功率分配策略进行电池组和电池单元的充放电指令分配, 所有电池单元在满足运行约束的条件下进行指令响应。

5.3.1 BESS 响应结果分析

本文 BESS 充放电指令响应结果如图 5 所示,

可见，在整个响应过程中本文提出的基于电池单元动态分组的 BESS 功率分配策略能有效跟踪充放电指令。

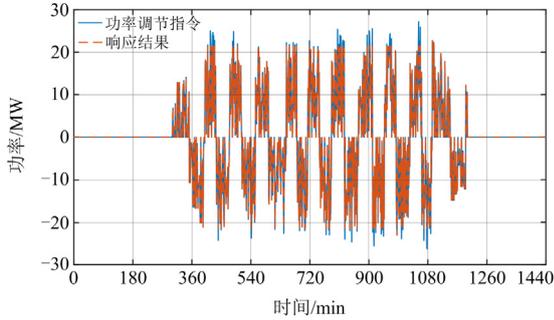


图 5 BESS 指令响应结果

Fig. 5 BESS instruction response results

5.3.2 电池组响应结果分析

电池组充放电指令响应结果如图 6 所示。由图 6 可知，PCG、BG 和 PDG 均能有效跟踪上层功率分配指令。

5.3.3 电池单元 SOC 一致性分析

电池单元运行过程的 SOC 曲线变化过程如图 7 所示。由图 7 可见，本文提出的 BESS 双层功率分配策略可保持 BESS 内所有电池单元具备良好的 SOC 一致性，同时 50 个电池单元在响应过程中均不存在过充过放现象。

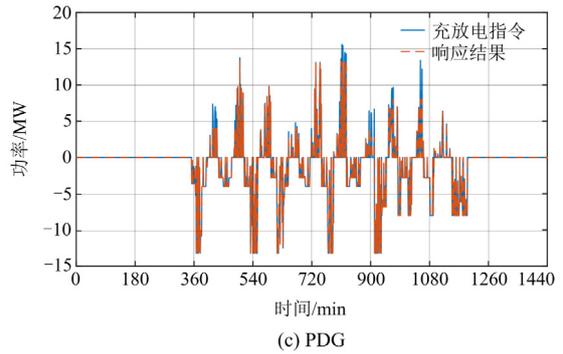


图 6 电池组指令响应结果

Fig. 6 Battery group command response results

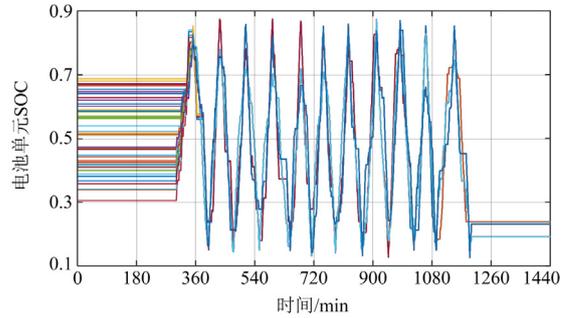


图 7 电池单元 SOC 变化曲线

Fig. 7 SOC variation curve of battery unit

5.4 BESS 平抑光伏波动效果分析及寿命损耗评估

5.4.1 BESS 平抑光伏波动效果分析

图 8 为本文提出的 BESS 光伏波动平抑策略的效果图。由图 8 可见，本文提出的控制策略有效平抑了光伏并网功率的波动，使得光伏电站并网功率更为平滑，并网更为安全，对电网影响更小。

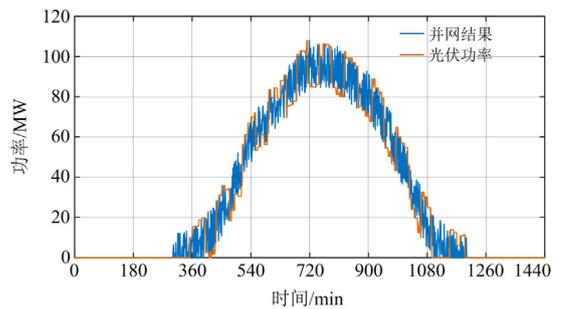
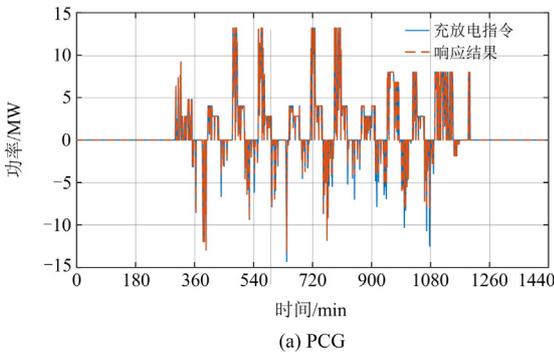


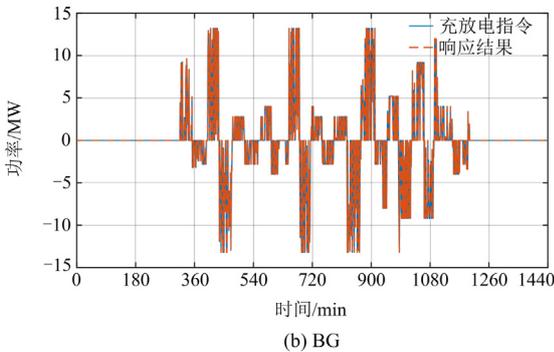
图 8 本文策略下光伏波动平抑效果

Fig. 8 Smoothing effect of photovoltaic fluctuations under the strategy of this paper

为验证本文所提基于 IDMO-KM 算法动态分组的双层功率分配策略的有效性，采用文献[26]定义的波动率和波动平抑性能两大指标对光伏功率波动



(a) PCG



(b) BG

平滑效果进行评价。同时, 为体现本文提出的控制策略的优越性, 将本文策略与其他 3 种平抑光伏波动的控制策略进行对比。其中, 策略 1 为基于文献[19]所用一致性原理的波动平移方法, 同时不采取任何分组方案。策略 2 为文献[21]提出的将 BESS 分为固定充电及放电组的策略。策略 3 为文献[27]提出的将 BESS 分为 3 组, 但固定其分配比例为 3:4:3。分别对 4 种策略进行文献[26]的评价指标计算, 评价结果如表 6 所示。由表 6 可见, 本文策略最大波动率最小, 平抑波动性能也最好。

表 6 不同控制策略下光伏波动平抑效果评价

Table 6 Evaluation of the smoothing effect of photovoltaic fluctuation under different control strategies

控制策略	最大波动率	平抑性能
本文策略	9.037	93.981
策略 1	9.706	88.016
策略 2	9.293	92.744
策略 3	9.188	92.832

5.4.2 BESS 寿命损耗评估

采用文献[28]设计的寿命损耗模型以及文献[29]提出的 BESS 剩余运行年限计算方法对以上 4 种策略进行评价, 对比结果如表 7 所示。同样的运行环境下, 本文策略的寿命损耗比其他 3 种策略更少, 剩余使用年限更久, 证明了本文控制策略的有效性及其优越性。

表 7 不同控制策略下 BESS 寿命损耗及剩余运行年限评价

Table 7 Evaluation of BESS life loss and remaining operating life under different control strategies

控制策略	寿命损耗/MWh	剩余运行年限/年
本文策略	0.001 07	10.27
策略 1	0.001 75	6.31
策略 2	0.001 41	7.76
策略 3	0.001 29	8.52

5.4.3 BESS 整体 SOC 均衡性分析

分别计算本文策略以及其他 3 种策略在调控前后的 BESS 整体 SOC 标准差, 结果如表 8 所示。可

表 8 不同控制策略下 BESS 调控前后 SOC 标准差

Table 8 SOC standard deviation before and after BESS regulation under different control strategies

控制策略	调控前 SOC 标准差	调控后 SOC 标准差
本文策略	0.87	0.0017
策略 1	0.87	0.0127
策略 2	0.87	0.0079
策略 3	0.87	0.0064

知, 相较于其他 3 种策略, 采用本文策略调控下的 BESS 整体 SOC 均衡效果最优, 证明本文策略可保证良好的 BESS 可持续调控能力。

6 结论

1) 提出了 IDMO 算法, 采用多个测试函数进行测试, 并与另外 4 种优化算法进行比较, 结果表明, IDMO 算法具有更高的寻优精度、更快的寻优速度以及更强的鲁棒性。

2) 设计了基于 IDMO 算法的改进 K-means 电池单元动态分组方法。首先, 构建了 IDMO-KM 算法, 提高了聚类准确度, 并加快了聚类速度; 在此基础上, 提出了基于 IDMO-KM 算法的动态分组策略, 有效降低了 BESS 寿命损耗。

3) 建立了基于充放电函数的电池单元 SOC 一致性功率分配方案。设计了表征电池单元充放电能力的 SOC 一致性充放电函数, 并基于此提出了 SOC 一致性功率分配方法, 对 3 个电池组及组内电池单元进行有效指令分配, 保证了 BESS 的持续可调能力。

4) 对所提控制策略的仿真验证结果表明, 所提光伏波动平抑策略能有效平滑光伏并网指令, 相较于其他平抑波动策略既能够有效降低 BESS 的寿命损耗, 平均可提高 BESS 剩余运行年限 2.74 年, 同时本文策略调控前后 SOC 标准差从 0.87 降低至 0.0017, 也能够保持良好的 SOC 一致性。

参考文献

- [1] 陈长青, 阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 169-177.
CHEN Changqing, YANG Tongguang. Research on grid energy storage and photovoltaic coordination planning with flexible load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 169-177.
- [2] 傅金洲, 孙鸣. 基于气候条件的光伏储能一体发电系统的能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 142-149.
FU Jinzhou, SUN Ming. Energy management strategy based on weather condition for photovoltaic-energy storage integrated power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 142-149.
- [3] 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 Yiyan, CHEN Jingwen. ISSA-based optimal configuration of optical storage microgrid hybrid energy storage capacity[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 23-29, 53.

- [4] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20, 87.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87.
- [5] 方保民, 李红志, 孔祥鹏, 等. 含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 121-129.
FANG Baomin, LI Hongzhi, KONG Xiangpeng, et al. Research on long-term distributed energy storage configuration with a high proportion of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 121-129.
- [6] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于 CEEMDAN-HT 的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 43-53.
YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [7] 李盈, 赵伟, 赵立宁, 等. 基于电池储能 SOC 的调峰、调频混合控制策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 48-55, 74.
LI Ying, ZHAO Wei, ZHAO Lining, et al. Mixed control strategy of peak regulation and frequency modulation based on SOC of battery energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 48-55, 74.
- [8] 杨欢红, 施颖, 黄文焘, 等. 考虑实时需求侧响应的光储充电站容量优化配置方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(7): 51-58.
YANG Huanhong, SHI Ying, HUANG Wentao, et al. Optimal capacity configuration method of photovoltaic-battery charging station considering real-time demand side response[J]. Smart Power, 2023, 51(7): 51-58.
- [9] VERMA N, KUMAR N, KUMAR R. Battery energy storage-based system damping controller for alleviating sub-synchronous oscillations in a DFIG-based wind power plant[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 524-541.
- [10] 魏炜, 陈晗, 朱洁, 等. 电池储能系统两模式协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 116-121.
WEI Wei, CHEN Han, ZHU Jie, et al. Two-mode coordinated control strategy for battery energy-storage system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 116-121.
- [11] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213-2220.
YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220.
- [12] 张宇华, 李青松, 王丛, 等. 区域风光低频相关性互补与高频混合储能平抑的并网方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1492-1504.
ZHANG Yuhua, LI Qingsong, WANG Cong, et al. Grid-connected method of regional wind-solar low-frequency correlation complementation and high-frequency hybrid energy storage stabilization[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1492-1504.
- [13] 臧鹏, 杨德昌. 多类型储能平抑风光联合发电系统控制策略研究[J]. 供用电, 2022, 39(7): 32-39.
ZANG Peng, YANG Dechang. Research on control strategy of multi-type energy storage flat wind-solar combined power generation system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 32-39.
- [14] 马兰, 谢丽蓉, 叶林, 等. 基于混合储能双层规划模型的风电波动平抑策略[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1016-1029.
MA Lan, XIE Lirong, YE Lin, et al. Wind power fluctuation suppression strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1016-1029.
- [15] 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 Electric Power Systems, 2020, 44(23): 38-46.
- [16] 孙秦峰, 李凤婷, 王森, 等. 提升风电场有功调节能力的风储系统多时间尺度运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 21-31.
SUN Qinfeng, LI Fengting, WANG Sen, et al. Multi-timescale operation strategy of a wind storage system to enhance the active regulation capacity of wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 21-31.
- [17] 余洋, 陈东阳, 吴玉威, 等. 风电跟踪调度计划时降低寿命损耗的电池储能分组控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 54-62.
YU Yang, CHEN Dongyang, WU Yuwei, et al. Grouping control strategy of battery energy storage for reducing life loss under wind power tracking scheduling plan[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 54-62.
- [18] YU Yang, CHEN 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.
- [19] 李付强, 汤茂东, 曲小慧, 等. 基于一致性理论的多源直流配网功率自适应控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 44-52.
LI Fuqiang, TANG Maodong, QU Xiaohui, et al. An adaptive power control strategy in multi-source DC distribution networks based on consensus theory[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 44-52.
- [20] 陈长青, 李欣然, 杨佯, 等. 基于风机调频特性的储能配置方法及协调运行策略[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 96-103.
CHEN Changqing, LI Xinran, YANG Yang, et al. Energy storage configuration method and coordinated operation strategy based on wind power frequency regulation characteristics[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 96-103.
- [21] 余洋, 陈东阳, 吴玉威, 等. 风电波动平抑下考虑 SOC 均衡及收益的电池储能功率分配策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1714-1723.
YU Yang, CHEN Dongyang, WU Yuwei, et al. Power allocation strategy considering SOC balance and income for battery energy storage in smoothing wind power fluctuations[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1714-1723.
- [22] 董锴, 蔡新雷, 崔艳林, 等. 基于旋转门算法的电池储能辅助单机跟踪 AGC 指令控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 147-156.
DONG Kai, CAI Xinlei, CUI Yanlin, et al. Tracking AGC commands control strategy of a thermal power unit assisted by battery energy storage based on a swing door trending algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 147-156.
- [23] LI Qiang, CHOI S S, YUAN Yue, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 148-158.
- [24] AGUSHAKA J O, EZUGWU A E, ABUALIGAH L. Dwarf mongoose optimization algorithm[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 391: 1-38.
- [25] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [26] GHOLAMI M, FATHI S H, MILIMONFARED J, et al. A new strategy based on hybrid battery-wind power system for wind power dispatching[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(1): 160-169.
- [27] SANGPANICH U. A novel method of decentralized battery energy management for stand-alone PV-battery systems[C] // 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference APPEEC 2014, December 7-10, Hong Kong, China: 1-5.
- [28] 王帅, 尹忠东, 郑重, 等. 电池模组一致性影响因素在放电电压曲线簇上的表征[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1836-1847.
WANG Shuai, YIN Zhongdong, ZHENG Zhong, et al. Representation of influence factors for battery module consistency on discharge voltage curves[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1836-1847.
- [29] 文汀, 随权, 林湘宁, 等. 计及共享全电船舶参与的海岛电网日前调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2416-2429.
WEN Ting, SUI Quan, LIN Xiangming, et al. Research on day-ahead dispatching strategy for grids with shared electric vessels on pelagic islands[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2416-2429.

收稿日期: 2023-07-14; 修回日期: 2023-09-15

作者简介:

余洋(1982—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力储能技术及柔性负荷建模与调度; E-mail: ncepu_yy@163.com

陆文韬(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能技术及车网互动技术。E-mail: luwentao0518@163.com

(编辑 周金梅)