DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.88 **中图分类号**：TM614 **文献标志码**：A

用于风电波动平抑的双蓄电池组混合储能控制策略

王利民[1,2](中国电源学会学生会员)，程 静[1,2]
(1.新疆大学电气工程学院，乌鲁木齐 830017；2.新疆大学可再生能源发电与并网技术控制教育部工程研究中心，乌鲁木齐 830017)

摘要：针对储能平抑风电功率波动过程中充放电状态切换频率过高，寿命减少的问题，提出基于双蓄电池组混合储能的波动平抑策略。首先采用自适应滑动平均滤波法对风电功率进行分解获取并网功率；其次对储能目标功率进行小波包分解获取混合储能参考功率，并使用模糊控制对储能目标功率进行优化，防止储能过充过放，保证储能运行在最佳充放电深度DOD(depth of discharge)。为使蓄电池运行在最佳DOD并减少工作状态切换次数，采用充、放电任务单独运行的双蓄电池组电路结构，设计自适应功率互补控制策略实现蓄电池组间的功率调度，并引入功率分配策略保证同组蓄电池各单元荷电状态平衡；最后对控制策略进行仿真分析，并采用雨流计数法对储能寿命进行评估。结果表明，所提控制策略能够减少储能充放电次数，提高储能寿命。

关键词：风电功率平抑；混合储能；自适应滑动平均滤波；功率分配

Hybrid Energy Storage Control Strategy Based on Dual Battery Packs for Wind Power Fluctuation Suppression

WANG Limin[1,2], *Student Member, CPSS*, CHENG Jing[1,2]
(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: Aimed at the problem that the charging and discharging state switching frequency is too high and the life is reduced during the process of wind power fluctuation suppression by energy storage, a fluctuation suppression control strategy based on the hybrid energy storage of dual battery packs is proposed. First, the adaptive moving average filter method is used to decompose the wind power to obtain the grid-connected power. Second, the wavelet packet decomposition of the energy storage target power is carried out to obtain the hybrid energy storage reference power, and the fuzzy control is used to optimize the energy storage target power, so as to prevent the energy storage from overcharge or overdischarge and make the energy storage run at the optimal depth of discharge (DOD). To make the battery run at the optimal DOD while reducing the switching times of working states, a circuit structure of dual battery packs running separately for charging and discharging tasks is adopted, and an adaptive power complementary control strategy is designed to realize power scheduling between battery packs. In addition, a power allocation strategy is also introduced to ensure the state-of-charge balance among each unit in the same battery pack. Finally, the control strategy is simulated and analyzed, and the rainflow counting method is used to evaluate the life of energy storage. Results show that the proposed control strategy can reduce the charging and discharging times of energy storage and prolong its life.

Keywords: Wind power fluctuation suppression; hybrid energy storage; adaptive moving average filter; power allocation

收稿日期：2023-06-14；**修回日期**：2023-09-18；**录用日期**：2023-11-29；**网络首发日期**：2024-03-09
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFB1506902)；新疆维吾尔自治区重大科技专项资助项目(2022A01001-4)；新疆维吾尔自治区重点研发资助项目(2022B01003-3)
This work is supported by National Key R&D Program of China under the grant 2021YFB1506902; Major Science and Technology Projects in Xinjiang Uygur Autonomous Region under the grant 2022A01001-4; Key R&D Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region under the grant 2022B01003-3

近年来新能源接入电网比例逐年上升，风电因其清洁和可持续性得到了极大的发展[1-3]。但风电受风速影响较大，具有随机波动性和间歇性，直接并网会导致电网电压波动、电力系统频率不稳定等问题[4-7]。储能技术的引入为上述问题提供了解决方案，电池储能系统 BESS(battery energy storage system)能够快速调节电能供需平衡，在发电侧配置储能能够平抑风电功率波动，提高并网稳定性[8-12]。

储能在平抑风电功率波动方面的应用可分为单一储能[13]、混合储能[2,14-15]和双储能[16-17]。文献[18]采用单蓄电池进行风电功率波动平抑，利用风电场短期功率预测信息,以荷电状态 SOC(state-of-charge)和风电波动范围为约束,通过滚动优化实现对储能的优化控制，防止储能 SOC 越限，但单一蓄电池控制在平抑风电波动过程中需频繁充放电，大大缩减了储能寿命；文献[19]采用小波包算法对原始风电功率进行分解，获取功率低频分量、中频分量和高频分量,利用蓄电池和超级电容的互补特性分别对中、高频分量进行平抑，混合储能系统 HESS(hybrid energy storage system)可以有效提升储能寿命，但蓄电池充放电次数依旧较高，且充放电深度远离最佳范围，影响储能寿命；文献[20]利用 MPC 预测控制算法获取并网功率，并采用双储能平抑风电波动，虽然可以极大地减少储能充放电状态切换次数，但电池瞬时充放电能力较差，不宜平抑瞬时大功率波动。同时双储能存在充放电能量不平衡的问题，若不对功率进行调整，当双储能同时接近荷电状态限值时，会频繁切换充放电状态，甚至失去平抑能力，且现有双储能控制策略的 2 组储能功率和容量均设为目标功率和累计能量的最大值，导致储能初期投资成本高、利用率低。

针对上述问题，本文提出 1 种用于风电功率波动平抑的双蓄电池组混合储能控制策略。首先采用自适应滑动平均滤波 AMAF(adaptive moving average filter)法获取并网功率；其次，采用小波包分解和模糊控制实现混合储能功率优化分配。此外，为降低蓄电池工作状态切换频率，采用充放电任务单独运行的双蓄电池组电路结构，通过累积概率分布对蓄电池目标功率的分布进行分析，实现双储能额定功率的设定，提高储能利用率；同时设计自适应功率互补控制策略，实现单组蓄电池出现功率缺额时，另一组蓄电池能够自适应调用相应数量储能单元实现功率互补，并引入功率分配策略对各单元进行功率细分，保证同组蓄电池各单元 SOC 趋于一致；最后，基于国内某风电场运行数据对所提平抑策略进行分析和验证。

1　风储发电系统

风储发电系统结构如图 1 所示。该系统主要由风电场、双蓄电池组、超级电容、AC-DC 与 DC-AC 变换器等装置构成。储能系统通过并网逆变器与风电场并联，经变换器功率控制后与风电场共同作用，后经变压器接入电网，实现风电功率的波动平滑。其中自适应功率互补控制系统负责 2 组储能之间的功率调度，功率分配系统对各储能单元进行功率细分。图中：P_{grid} 为风电并网功率；P_{w} 为风电实际出力；P_{Hess} 为储能目标功率；P_{sc} 和 P_{ba} 分别为超级电容和蓄电池的平抑功率；P_{A} 和 P_{B} 分别为 2 组蓄电池的功率。根据图 1 的能量流动可以看出，当 $P_{\mathrm{Hess}}>0$ 时，储能系统处于放电状态，补足风电功率缺额；当 $P_{\mathrm{Hess}}<0$ 时，储能系统处于充电状态，对风电进行消纳。

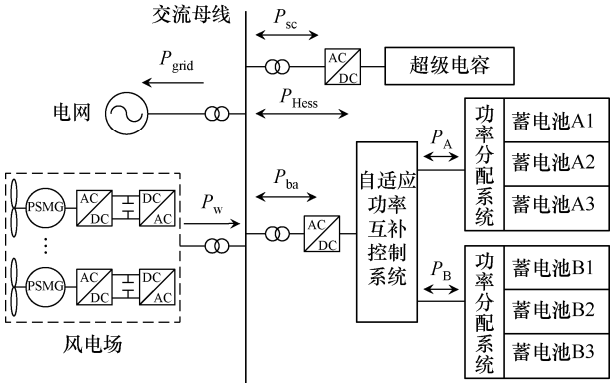


图 1　风储并网结构

Fig. 1 Wind-storage grid-connected structure

2 风电波动平抑与 HESS 功率分配

2.1 自适应滑动平均滤波对风电平滑

滑动平均滤波 MAF(moving average filter)法通过在 1 个固定的窗口对数据做算术平均，并延时间序列滑动窗口，引入新数据，剔除旧数据，实现信号的滑动滤波，其表达式为

$$P_{\mathrm{g}}(t)=\frac{1}{L}\sum_{j=0}^{L-1}P_{\mathrm{w}}(t-j) \tag{1}$$

式中：t 为原始数据编号；L 为 t 时刻滑动窗口长度；$P_{\mathrm{g}}(t)$ 为 t 时刻并网功率。

MAF 是 1 种滤除高频波动的有效方法，具有算法简单、输出稳定、抑制效果好等优点，但平滑效果受窗口大小影响很大。窗口过小，所得并网功率不符合并网标准；窗口过大，并网功率过于平滑，增加储能压力。因此，提出 1 种 AMAF 法获取并网功率，AMAF 可依据不同时刻风电波动程度自适应获取满足并网标准的最佳滑动窗口，并保证所得并网功率最大限度跟踪原始风电功率，降低储能压力，AMAF 的算法流程如图 2 所示。

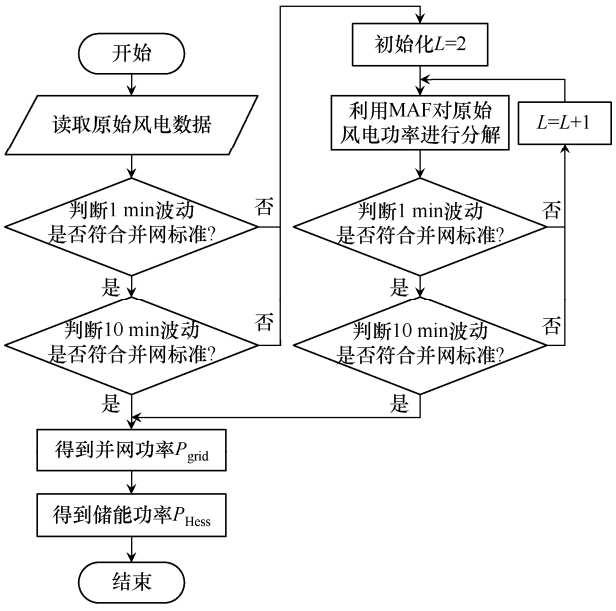


图 2 AMAF 的算法流程

Fig. 2 Flow chart of AMAF

2.2 混合储能功率分配

2.2.1 小波包分解对混合储能功率一次分配

本文采用小波包分解法对 2 种类型储能进行功率分配，与小波变换不同，小波包可同时对高频信号和低频信号进行处理，且分解更加详细，具有时频局部化的特点，n 层小波包树的结构如图 3 所示，其中 $P(n,\ 0)\sim P(n,\ g-1)$ 为低频分量，$P(n,\ g)\sim P(n,\ 2^n-1)$ 为高频分量。

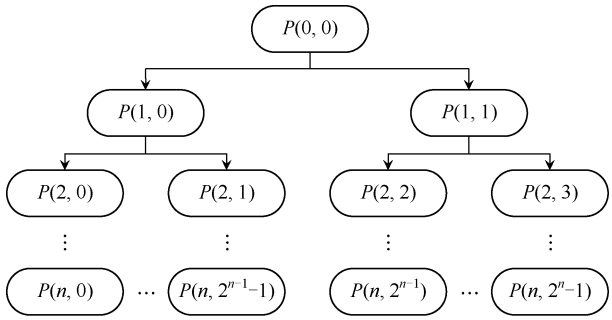


图 3 n 层小波包树结构

Fig. 3 Structure of *n*-layer wavelet packet tree

小波包的分解和重构表达式为

$$\begin{cases}d_k^{i+1,2n}=\sum_l h_{2l-k}d_l^{i,n}\\ d_k^{i+1,2n+1}=\sum_l g_{2l-k}d_l^{i,n}\end{cases} \tag{2}$$

$$d_l^{i,n}=\sum_k h_{l-2k}d_k^{i+1,2n}+\sum_k g_{l-2k}d_k^{i+1,2n+1} \tag{3}$$

式中：h、g 为滤波器系数；d 为小波包分解数；k、n 为小波包分解层数；i、l 为小波包节点数。

对储能目标功率分解再重构可得 n 个频带频率范围为 $[2^{i-1}f_{P(n,i)},\ 2^i f_{P(n,i)}]$ 的信号，其中 $f_{P(n,i)}$ 为频带带宽，且 $f_{P(n,i)}=f_{\mathrm{s}}/2^{n+1}$，$f_{\mathrm{s}}$ 为采样频率。为充分发挥不同类型储能的优势，利用小波包算法将储能目标功率分解再分配。由文献[21]得，蓄电池充放电响应时间为数分钟到数小时，超级电容响应时间为数毫秒到几十分钟，因此本文选取10 min 时的响应频率 1.67×10^{-3} Hz 作为 2 种类型储能充放电响应的分界频率，低于该频率的功率由蓄电池平抑，高于该频率的功率由超级电容平抑，则高频分量和低频分量分别为

$$\begin{cases}P'_{\mathrm{ba}}=P(n,0)+P(n,1)+\cdots+P(4,g-1)\\ P'_{\mathrm{sc}}=P(n,g)+P(n,g+1)+\cdots+P(n,n-1)\end{cases} \tag{4}$$

式中：P'_{ba} 和 P'_{sc} 分别为经小波包分解后蓄电池和超级电容的功率；g 为高频分量与低频分量的分界点。

2.2.2　模糊控制对混合储能功率二次分配

超级电容容量较小，为保证功率平抑能力，防止 SOC 越限，同时避免双蓄电池组因充放电能量相差较大导致工作状态频繁切换，进而失去平抑能力，采用模糊控制对储能功率进行优化，实现功率二次分配。双蓄电池组充放电不平衡主要有 2 种情况：一是放电量大于充电量，即 $S_{OC,A}(t)+S_{OC,B}(t)<100\%$，$S_{OC,A}(t)$、$S_{OC,B}(t)$ 分别为 t 时刻 2 组蓄电池的 SOC；二是充电量大于放电量，即 $S_{OC,A}(t)+S_{OC,B}(t)>100\%$。

模糊控制器 1、模糊控制器 2 分别对超级电容和双蓄电池组的功率进行调控，将 $S_{OC,A}$、$S_{OC,B}$、超级电容 SOC(即 $S_{OC,sc}$)、P'_{sc} 和 P'_{ba} 作为输入量，调整后的功率作为输出量，控制策略如图 4 所示。模糊控制器运行规则为：①当 $S_{OC,sc}$ 大于期望值且充电功率偏大，或 $S_{OC,sc}$ 小于期望值且放电功率偏大时，模糊控制器 1 对超级电容功率指令进行调节，修正产生的 ΔP_{sc} 由蓄电池进行补偿；②模糊控制器 2 控制规则与模糊控制器 1 相似，即当蓄电池组 $S_{OC,A}(t)+S_{OC,B}(t)>100\%$ 且充电功率偏大，或 $S_{OC,A}(t)+S_{OC,B}(t)<100\%$ 且放电功率偏大时，模糊控制器 2 对蓄电池功率进行修正。

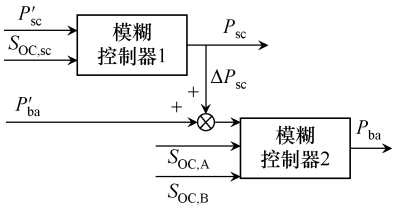


图 4　模糊控制策略

Fig. 4 Fuzzy control strategy

3　双蓄电池组自适应功率互补控制策略

基于混合储能的风电平滑策略降低了蓄电池充放电次数，但其工作状态切换频率依然较高，且储能充放电深度较小。浅充浅放运行模式下虽然循环次数高，但寿命衰减系数较大，影响储能寿命[22]。为解决上述问题，本文采用双蓄电池组电路结构，并设计自适应功率互补控制策略和功率分配策略。

3.1　双蓄电池组电路结构及工作原理

为延长蓄电池使用寿命，采用充电任务和放电任务单独运行的电路结构。将蓄电池分为多个单元并组成 2 组，后经变换器接入系统，结构如图 1 所示。其工作原理为：正常运行时，2 组蓄电池一组用于充电，另一组用于放电；当一组蓄电池功率不足以满足当前波动平抑时，另一组蓄电池根据功率缺额自适应调用相应数量蓄电池单元辅助完成本次平抑；当其中一组达到荷电状态限值时，2 组蓄电池切换充放电状态。其工作流程如图 5 所示。

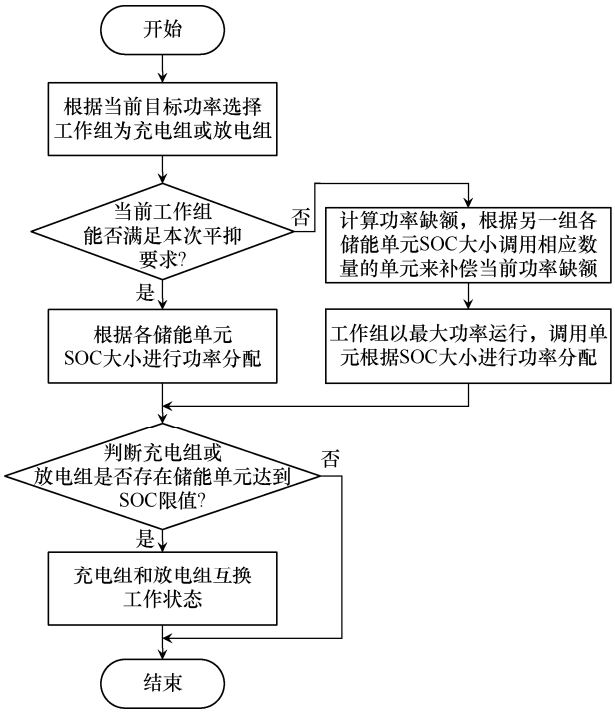


图 5　双蓄电池组工作原理

Fig. 5 Working principle for dual battery packs

本文以 6 个储能单元为例进行分析，并将其分为 A 组和 B 组，各单元分别为 A1、A2、A3、B1、B2、B3。在系统安全运行的原则下，约束关系为

$$\begin{cases} S_{OC,min} \leqslant S_{OC,Ar}(t) \leqslant S_{OC,max} \\ S_{OC,min} \leqslant S_{OC,Br}(t) \leqslant S_{OC,max} \\ P_A(t)+P_B(t)=P_{ba}(t) \\ |P_{Ar}(t)| \leqslant P_{max} \\ |P_{Br}(t)| \leqslant P_{max} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$S_{\mathrm{OC,min}}$ 和 $S_{\mathrm{OC,max}}$ 分别为储能单元运行过程中荷电状态的最小值和最大值；$S_{\mathrm{OC,Ar}}(t)$ 和 $S_{\mathrm{OC,Br}}(t)$ 分别为 A 组和 B 组储能的第 r 个储能单元在 t 时刻的 SOC，r=1, 2, 3；$P_{\max}$ 为储能单元所支持的最大充放电功率；$P_{\mathrm{Ar}}(t)$ 和 $P_{\mathrm{Br}}(t)$ 为 A 组和 B 组储能的第 r 个储能单元在 t 时刻的功率；$P_{\mathrm{A}}(t)$ 和 $P_{\mathrm{B}}(t)$ 分别为 A 组和 B 组储能的总功率指令。

3.2 功率分配策略

蓄电池单元调用次数及分配功率的不同会使得该组各单元间SOC相差较大，若不对其进行功率调控，易导致各蓄电池单元功率支撑能力差距增大，影响储能平抑能力。为保证多次调用后，同组储能单元间SOC仍然能够快速趋于一致，引入功率分配策略。设储能功率分配系数为 $k_r(t)$，则 $k_r(t)$、$P_{\mathrm{Ar}}(t)$ 和 $P_{\mathrm{A}}(t)$ 的关系为

$$k_r(t)=\frac{P_{\mathrm{Ar}}(t)}{P_{\mathrm{A}}(t)} \tag{6}$$

不考虑各蓄电池单元功率和容量的差异性，为保证功率指令分配到每个储能单元并维持总功率守恒，对 $k_r(t)$ 做归一化处理，设 $P_{\mathrm{Ar}}(t)$ 充电和放电时的功率占比系数为 $Q_{\mathrm{Ar}}(t)$ 和 $Q'_{\mathrm{Ar}}(t)$，则 $k_r(t)$、$Q_{\mathrm{Ar}}(t)$、$Q'_{\mathrm{Ar}}(t)$ 关系为

$$k_r(t)=\begin{cases}\dfrac{Q_{\mathrm{Ar}}(t)}{\sum\limits_{r=1}^{3}Q_{\mathrm{Ar}}(t)} & P_{\mathrm{A}}(t)>0\\[2ex] \dfrac{Q'_{\mathrm{Ar}}(t)}{\sum\limits_{r=1}^{3}Q'_{\mathrm{Ar}}(t)} & P_{\mathrm{A}}(t)<0\end{cases} \tag{7}$$

考虑SOC差异性并使其快速趋于一致，令

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{Ar}}(t)=\mathrm{e}^{-aS_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}\\ Q'_{\mathrm{Ar}}(t)=\mathrm{e}^{-a(1-S_{\mathrm{OC,Ar}}(t))}\end{cases} \tag{8}$$

式中，a 为 $Q_{\mathrm{Ar}}(t)$ 和 $Q'_{\mathrm{Ar}}(t)$ 的调节系数，且 $a\geqslant 0$。

为防止SOC相近时降低其趋于一致的速度，对储能荷电状态进行映射放大，其表达式为

$$S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)=\frac{S_{\mathrm{OC,Ar}}(t)-\min(S_{\mathrm{OC,Ar}}(t))}{\max(S_{\mathrm{OC,Ar}}(t))-\min(S_{\mathrm{OC,Ar}}(t))} \tag{9}$$

根据 $P_{\mathrm{A}}(t)$ 和 SOC 的关系，可得 a 越大，SOC 趋于一致的速度越快，结合式(5)各约束关系计算可得 a 的最大值 $a_{\max}=\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|$，根据式(5)~式(9)可得各蓄电池分配功率表示为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}{\sum\limits_{r=1}^{3}\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}P_{\mathrm{A}}(t)\\[2ex] P'_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)(1-S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t))}}{\sum\limits_{r=1}^{3}\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)(1-S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t))}}P_{\mathrm{A}}(t)\end{cases} \tag{10}$$

由式(10)可知，该分配策略计算简单，便于实施，但仅适用于各储能单元所能支撑最大功率相等的情况。当储能单元荷电状态接近上限或下限时，若SOC不同，则 $P_{\mathrm{Ar}}(t)$ 的最大值 $P_{\mathrm{Ar,max}}(t)$ 也不同，上述分配策略不再适用。此时为满足式(5)各储能约束要求，将 $P_{\max}$ 作为参考值并进行折算，同时对 k 的最大值进行调整，代入 $\tau=\mathrm{e}^{k_{\max}}$，可得

$$\begin{cases}P_{\max}=\dfrac{|P_{\mathrm{A}}(t)|}{3}\tau\\[2ex] \sum\limits_{r=1}^{3}\tau^{-S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}\left(\dfrac{P_{\mathrm{Ar,max}}(t)}{P_{\mathrm{A}}(t)/3}\right)=0\end{cases} \tag{11}$$

可证明 $\tau\in[1,+\infty)$ 范围内，通过数值迭代法可获取唯一的 $k'_{\max}$ 和 $P'_{\max}$ 使得储能系统能够同时满足最大功率约束和总功率分配平衡，此时储能的分配功率为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P'_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}{\sum\limits_{r=1}^{3}\mathrm{e}^{-(\ln P'_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}\cdot\\[2ex] \qquad\dfrac{P_{\mathrm{Ar,max}}(t)}{P'_{\max}}P_{\mathrm{A}}(t)\\[2ex] P'_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P'_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)(1-S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t))}}{\sum\limits_{r=1}^{3}\mathrm{e}^{-(\ln P'_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{A}}(t)|)(1-S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t))}}\cdot\\[2ex] \qquad\dfrac{P_{\mathrm{Ar,max}}(t)}{P'_{\max}}P_{\mathrm{A}}(t)\end{cases} \tag{12}$$

该策略可适用于 $P_{\mathrm{Ar,max}}(t)$ 存在差异时的状况，但需迭代获取分配功率，计算相对复杂，具有一定滞后性。

3.3 自适应功率互补控制策略

为实现蓄电池组间自适应功率互补，保证各储

能单元荷电状态平衡且具有足够的功率平抑能力，根据不同的储能工作模式结合 2 种功率分配策略的特点对储能进行功率分配，以 $P_{\mathrm{ba}}>0$，且 A 组蓄电池为充电组为例进行分析。

(1)模式一：A 组各单元 SOC 相同，且 $\sum_{r=1}^{3}P_{\mathrm{Ar,max}}(t)\geqslant P_{\mathrm{ba}}(t)$。此时为正常工作状态，此阶段 A 组和 B 组各蓄电池单元功率为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{P_{\mathrm{ba}}(t)}{3}\\ P_{\mathrm{Br}}(t)=0\end{cases}\tag{13}$$

(2)模式二：A 组各单元 SOC 不同，$P_{\mathrm{Ar,max}}(t)$ 相同，且 $\sum_{r=1}^{3}P_{\mathrm{Ar,max}}(t)\geqslant P_{\mathrm{ba}}(t)$。此时需考虑 SOC 差异性，保证荷电状态快速趋于一致，此阶段 A 组和 B 组各蓄电池单元功率为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{ba}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}{\sum_{r=1}^{3}\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{ba}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}P_{\mathrm{ba}}(t)\\ P_{\mathrm{Br}}(t)=0\end{cases}\tag{14}$$

(3)模式三：A 组各单元 SOC 不同，$P_{\mathrm{Ar,max}}(t)$ 不同，且 $\sum_{r=1}^{3}P_{\mathrm{Ar,max}}(t)\geqslant P_{\mathrm{ba}}(t)$，此时 A 组部分单元接近荷电状态上限，不支持以 $P_{\max}$ 完成本次平抑，需考虑储能 $P_{\mathrm{Ar,max}}(t)$ 所带来的影响，此阶段 A 组和 B 组各蓄电池单元功率为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P'_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{ba}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}{\sum_{r=1}^{3}\mathrm{e}^{-(\ln P'_{\max}+\ln 3-\ln|P_{\mathrm{ba}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,Ar}}(t)}}\dfrac{P_{\mathrm{Ar,max}}(t)}{P'_{\max}}P_{\mathrm{ba}}(t)\\ P_{\mathrm{Br}}(t)=0\end{cases}\tag{15}$$

(4)模式四：A 组各单元满足 $P_{\mathrm{Ar,max}}(t)=P_{\max}$，且 $\sum_{r=1}^{3}P_{\mathrm{Ar,max}}(t)<P_{\mathrm{ba}}(t)$，此时 A 组蓄电池功率不足以完成此次波动平抑，需要 B 组补足功率缺额，设调动储能数量为 m，并对单元序号依据 SOC 由小到大重新编排为 j'，此阶段 A 组和 B 组各蓄电池单元功率为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=P_{\max}(r)\\ P_{\mathrm{B}j'}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln m-\ln|P_{\mathrm{B}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,B}j'}(t)}}{\sum_{j'=1}^{m}\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln m-\ln|P_{\mathrm{B}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,B}j'}(t)}}P_{\mathrm{B}}(t)\end{cases}\tag{16}$$

(5)模式五：A 组蓄电池单元满足 $P_{\mathrm{Ar,max}}(t)<P_{\max}$，且 $\sum_{r=1}^{3}P_{\mathrm{Ar,max}}(t)<P_{\mathrm{ba}}(t)$，此时 A 组剩余容量不足以满足此次平抑，需要调动 B 组补足功率缺额，且 A 组存在储能单元接近荷电状态上限，此次工作结束后 A 组和 B 组互换充放电状态，B 组切为充电组，此阶段 A 组和 B 组各蓄电池单元功率为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Ar}}(t)=P_{\mathrm{Ar,max}}(t)\\ P_{\mathrm{B}j'}(t)=\dfrac{\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln m-\ln|P_{\mathrm{B}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,B}j'}(t)}}{\sum_{j'=1}^{m}\mathrm{e}^{-(\ln P_{\max}+\ln m-\ln|P_{\mathrm{B}}(t)|)S'_{\mathrm{OC,B}j'}(t)}}P_{\mathrm{B}}(t)\end{cases}\tag{17}$$

4　Hess 的寿命评估与经济性分析

4.1　混合储能系统的寿命模型

由于蓄电池循环寿命有限，频繁充放电和高倍率充放电会减少其使用寿命，影响混合储能系统的经济性。在风电波动平抑中，蓄电池并非运行于某一特定充放电深度，而是工作在不断充放电的状态。本文采用雨流计数法获取 1 个工作周期内蓄电池的等效寿命[23]。某型号铅酸电池的充放电深度 D_{DoD} 与循环寿命 N_{ctf} 之间的关系为

$$N_{\mathrm{ctf}}=-3\,278D_{\mathrm{DoD}}^{4}-5D_{\mathrm{DoD}}^{3}+12\,823D_{\mathrm{DoD}}^{2}-14\,122D_{\mathrm{DoD}}+5\,112\tag{18}$$

蓄电池第 x 次循环周期的充放电深度为 $D_{\mathrm{DoD}}(x)$，则等效循环寿命为

$$N(D_{\mathrm{DoD}}(x))=N_{\mathrm{ctf}}(1)/N_{\mathrm{ctf}}(D_{\mathrm{DoD}}(x))\tag{19}$$

式中：$N_{\mathrm{ctf}}(1)$ 为当充放电深度为 1 时的循环寿命；$N_{\mathrm{ctf}}(D_{\mathrm{DoD}}(x))$ 为当充放电深度为 $D_{\mathrm{DoD}}(x)$ 时的循环寿命。

蓄电池 1 个周期内的等效循环寿命为

$$N=\sum_{D_{\mathrm{DoD}}=0.01}^{D_{\mathrm{DoD}}=1}\frac{N_{\mathrm{ctf}}(1)}{N_{\mathrm{ctf}}(D_{\mathrm{DoD}}(x))}\tag{20}$$

蓄电池 1 个周期内的寿命损耗为

$$T=\frac{N_{\mathrm{ctf}}(1)}{N} \tag{21}$$

当 $N=N_{\mathrm{ctf}}(1)$ 或 $T=1$ 时，认为蓄电池寿命耗尽。

超级电容寿命较长，其循环次数可达 5×10^5 ~ 5×10^6 次，且使用寿命受温度、工作电流、循环次数等多因素影响，目前暂无准确寿命模型，一般根据实际经验将超级电容的使用寿命设为定值。

4.2 混合储能系统的成本分析

本文采用全寿命周期的年化成本 F_{Hess} 对储能做经济性评估，将储能设备年化初始投资成本 F_{cap}、更换成本 F_{rep}、维护成本 F_{maint} 之和作为最终投资成本，可表示为

$$F_{\mathrm{Hess}}=F_{\mathrm{cap}}+F_{\mathrm{rep}}+F_{\mathrm{maint}} \tag{22}$$

混合储能设备的初始投资成本为

$$F_{\mathrm{cap}}=(\lambda_{\mathrm{pb}}P_{\mathrm{bt}}+\lambda_{\mathrm{eb}}E_{\mathrm{bt}}+\lambda_{\mathrm{pc}}P_{\mathrm{sc}}+\lambda_{\mathrm{ec}}E_{\mathrm{sc}})\xi_{\mathrm{crf}} \tag{23}$$

$$\xi_{\mathrm{crf}}=\frac{\rho(1+\rho)^{T_{\mathrm{Hess}}}}{(1+\rho)^{T_{\mathrm{Hess}}}-1} \tag{24}$$

式中：λ_{pb}、λ_{eb} 为蓄电池的单位功率成本和单位容量成本；λ_{pc}、λ_{ec} 为超级电容的单位功率成本和单位容量成本；P_{bt}、E_{bt} 为蓄电池的功率和容量；P_{sc}、E_{sc} 为超级电容的功率和容量；ζ_{crf} 为等年值折算系数；ρ 为资本的贴现率；T_{Hess} 为储能设备寿命。

混合储能设备更换成本为

$$F_{\mathrm{rep}}=[(\lambda_{\mathrm{pb}}P_{\mathrm{bt}}+\lambda_{\mathrm{eb}}E_{\mathrm{bt}})n_{\mathrm{bt}}+(\lambda_{\mathrm{pc}}P_{\mathrm{sc}}+\lambda_{\mathrm{ec}}E_{\mathrm{sc}})n_{\mathrm{sc}}]\xi_{\mathrm{crf}} \tag{25}$$

式中，n_{bt}、n_{sc} 为全寿命周期中蓄电池和超级电容的更换次数。

混合储能设备的维护成本为

$$F_{\mathrm{maint}}=\lambda_{\mathrm{maint,bt}}E_{\mathrm{bt}}+\lambda_{\mathrm{maint,sc}}E_{\mathrm{sc}} \tag{26}$$

式中，$\lambda_{\mathrm{maint,bt}}$、$\lambda_{\mathrm{maint,sc}}$ 为蓄电池和超级电容的单位容量维护成本。

5 算例仿真

以国内某装机容量为 30 MW 的风电场输出风功率为例，在 MATLAB 中进行仿真验证(采样间隔 1 min)。根据我国风电并网标准，装机容量在 30 MW 内的风电场，1 min 内最大有功变化不得超过 3 MW，10 min 内最大有功变化不得超过 10 MW。蓄电池充放电深度为 0.2 ~ 0.8，超级电容充放电深度为 0.1 ~ 0.9，初始 SOC 均设为 0.5。观察 2 种类型储能能量累积最大值，并对蓄电池目标功率累计概率分布进行分析，可得超过 90%的蓄电池目标功率值低于其最大功率值的 1/2，将 2 组蓄电池目标功率设为 $P_{\mathrm{ba,max}}/2$。超级电容功率和容量分别为 7.933 3 MW 和 0.310 4 MW·h；2 组蓄电池功率和容量分别为 1.495 MW 和 2.169 MW·h。

5.1 自适应滑动平均滤波法的风电功率波动平抑效果

根据电力系统技术规定可得传统滑动平均滤波法获取符合标准并网功率的最佳滑动窗口为 $L=5$，以该窗口对原始风电功率进行分解获取目标功率，再采用本文所用 AMAF 法对原始风电功率进行分解获取并网功率。将 2 种分解算法所得目标功率进行对比，其曲线如图 6 所示。利用原始风电功率和并网功率的差值可得储能系统目标功率，其曲线如图 7 所示。可以看出，采用 AMAF

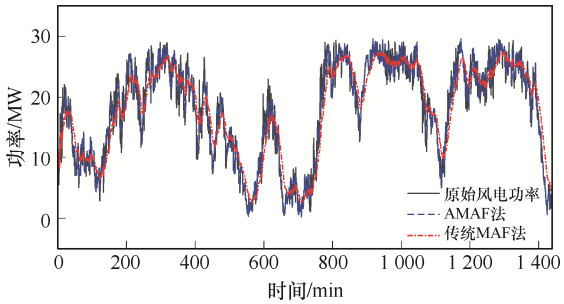


图 6 风电并网目标功率曲线

Fig. 6 Target power curves for wind power grid-connection

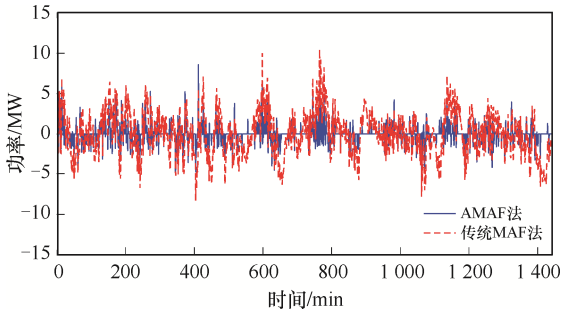


图 7 储能目标功率曲线

Fig. 7 Target power curves for energy storage

法所得并网功率可以最大限度跟踪原始风电功率，且所得储能目标功率波动幅值和频率更低，降低了对储能功率和容量的要求。且风电功率经平滑后，1 min 内最大波动量由 4.96 MW 下降至 2.93 MW，10 min 内最大波动量由 12.28 MW 下降至 9.86 MW，以上 2 组数据表明所得并网功率符合国家标准。

5.2　双蓄电池组混合储能自适应功率互补控制策略的有效性验证

为充分发挥不同类型储能的特点，采用 db6 小波函数对混合储能目标功率进行 4 层小波包分解,以 1.67×10^{-3} Hz 作为分界频率进行分配，高于该频率的功率由超级电容进行平抑，低于该频率的功率由蓄电池进行平抑。图 8 和图 9 为经小波包分解后的超级电容和蓄电池目标功率曲线，可以看出超级电容平抑高频波动功率，蓄电池平抑低频波动功率。

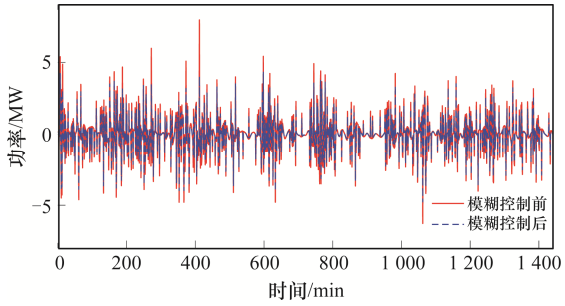


图 8　超级电容功率曲线

Fig. 8 Power curve for supercapacitor

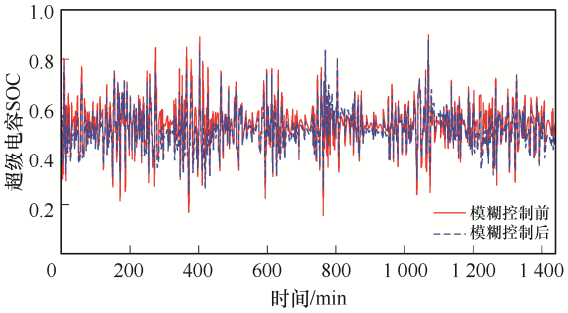


图 9　蓄电池功率曲线

Fig. 9 Power curve for battery

利用模糊控制对功率分配进行优化，将经模糊控制优化和未经模糊控制优化的储能工作状态进行对比，结果如图 10 和图 11 所示。可以看出经模糊控制优化后超级电容功率和 SOC 波动范围得到了有效控制，有效避免了过充过放，保证了超级电容平抑能力。

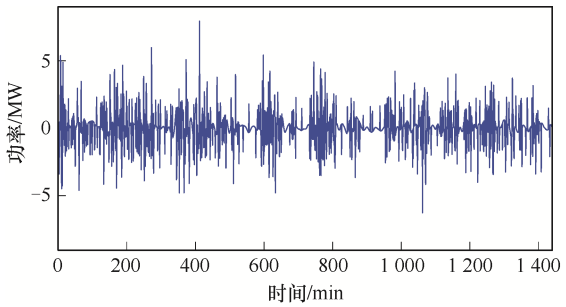


图 10　超级电容目标功率曲线

Fig. 10 Target power curves for supercapacitor

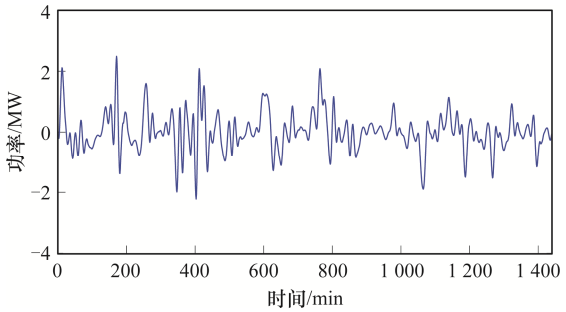


图 11　超级电容荷电状态曲线

Fig. 11 SOC curves for supercapacitor

模糊控制优化前后蓄电池总功率曲线和荷电状态如图 12 和图 13 所示。可以看出，经模糊控制优化后蓄电池功率波动幅值得到了有效控制，且双蓄电池组荷电状态良好时，加入模糊控制和未加入模糊控制的出力相似。而 822 ~ 1 255 min 时段，充电量和放电量不平衡，模糊控制对储能出力进行了调整，有效避免了双蓄电池组因同时接近 SOC 限值而频繁切换充放电状态，保证了储能系统的运行稳定性。

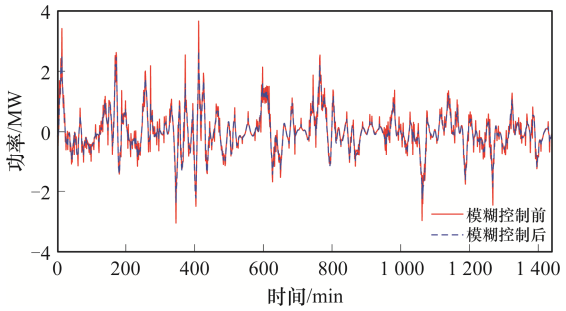
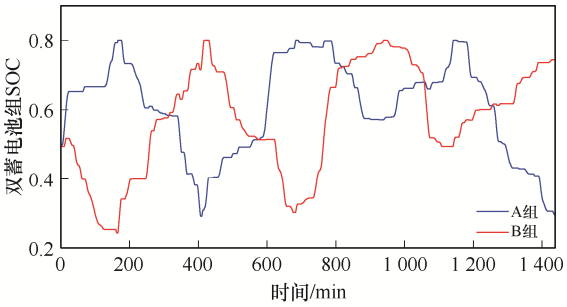


图 12　模糊优化前后蓄电池总功率曲线

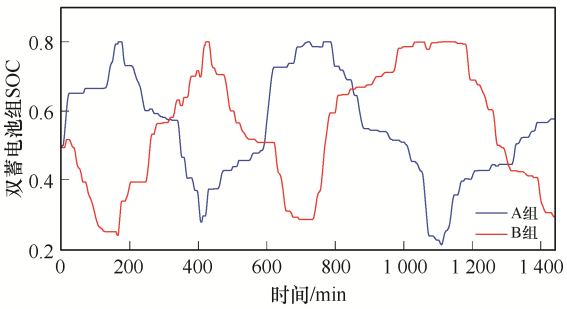
Fig.12 Fuzzy optimization of the total battery power curve before and after

应用本文所提控制策略对双蓄电池组实际充放电效果进行验证，结果如图 14 和图 15 所示。将

传统混合储能控制策略与本文所提策略进行对比，为保证 2 种策略具有相同的初期投资成本，与本文



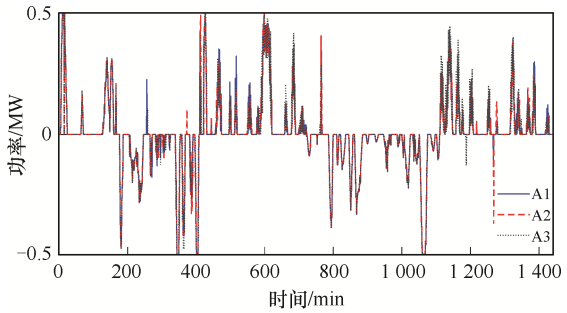
(a) 模糊控制前



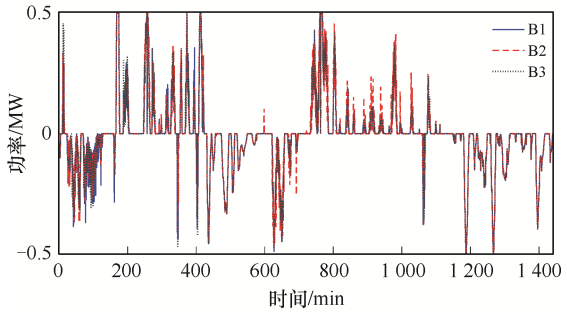
(b) 模糊控制后

图 13 模糊优化前后双蓄电池组荷电状态

Fig. 13 SOC of dual battery packs before and after fuzzy optimization



(a) A组蓄电池



(b) B组蓄电池

图 14 2 组蓄电池各单元目标功率曲线

Fig. 14 Target power curves for each unit of dual battery packs

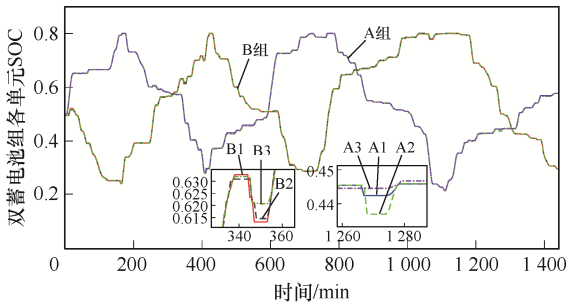


图 15 双蓄电池组各单元 SOC 运行曲线

Fig. 15 SOC operating curves for each unit of dual battery packs

策略设置相同功率和容量，其 SOC 运行曲线如图 16 所示。

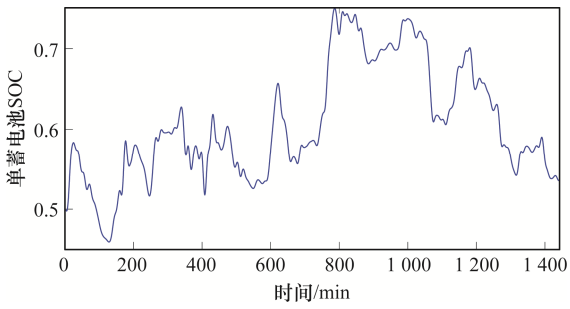


图 16 单蓄电池 SOC 运行曲线

Fig. 16 SOC operating curve for single battery pack

由图 14 和图 15 可以看出，163~427 min，A 组蓄电池出现功率缺额，需 B 组辅助平抑。345 min 时，功率缺额为 0.410 3 MW，调用单个蓄电池单元便可辅助完成波动平抑，将 B 组各单元 SOC 进行对比，可得 B1 荷电状态最大，调用 B1。346 min 时，功率缺额为 0.885 5 MW，调用单组蓄电池无法辅助完成平抑，此时 B1、B2、B3 荷电状态分别为 0.623 3、0.630 9、0.631 9，因此调用 B2、B3，且分配功率分别为 0.416 7 MW、0.468 8 MW，可以看出 SOC 越大，分配功率越大。经调用后，B 组各蓄电池单元间 SOC 相差较大，由荷电状态曲线可知在 349 min 后，B1、B2、B3 荷电状态分别为 0.613 2、0.614 6、0.620 7。354 min 时，B 组蓄电池开始充电，此时各单元分配功率分别为 0.220 5 MW、0.177 6 MW、0.068 9 MW，可以看出 SOC 越大分配功率越小。经过多次功率调整后，359 min 时 B 组蓄电池各单元 SOC 分别为 0.640 3、0.640 4、0.638 9，荷电状态趋于一致。同理，可分

析1 257～1 283 min时段A组辅助B组平抑过程。通过对不同时段工作模式进行分析可得，本文所提策略可以实现蓄电池组间的自适应功率互补，并保持同组蓄电池各单元SOC趋于一致。

5.3 储能寿命和经济性评估结果

为证明本文所提策略相较于传统混合储能的优越性，将2种方式进行对比，仿真参数见表1[24]，仿真结果如图12~图15所示，同时采用雨流计数法对储能寿命进行评估，并对其年化成本进行分析，结果见表2。可以看出，在模糊控制和自适应功率互补控制策略的调控下，双蓄电池组充放电状态切换次数明显降低且充放电深度基本运行在0.2～0.8，而单蓄电池储能工作状态切换较为频繁且充放电深度远离最佳值。对2种运行方式储能状态切换次数进行计数可得采用自适应功率互补的双蓄电池组混合储能交换次数最大为15，而单蓄电池状态交换次数为96。可见，采用本文所提控制策略，不仅能够平抑风电功率波动使其达到并网标准，而且可以降低蓄电池组工作状态切换次数，同时维持超级电容和蓄电池组充放电能量动态平衡，保证SOC运行在最佳状态，从而延长储能寿命，提高储能经济性，保证储能系统稳定运行。

表 1　系统相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of system

参数	数值
蓄电池单位功率成本 λ_{pb} /(元·kW^{-1})	1 200
蓄电池单位容量成本 λ_{eb} /[元·(kW·h)$^{-1}$]	500
超级电容单位功率成本 λ_{pc} /(元·kW^{-1})	1 000
超级电容单位容量成本 λ_{ec} /[元·(kW·h)$^{-1}$]	30 000
单位容量蓄电池年维护成本 $\lambda_{maint,bt}$ /[元·(kW·h)$^{-1}$]	50
单位容量超级电容年维护成本 $\lambda_{maint,sc}$ /[元·(kW·h)$^{-1}$]	50
全寿命周期 T_{Hess} /a	20
资本贴现率 ρ	0.05
全寿命周期超级电容器更换次数 n_{sc}	1

表 2　储能运行寿命评估

Tab. 2 Evaluation on operating life of energy storage

储能构成		状态切换次数	储能寿命/a	混合储能系统年化成本/万元
单蓄电池储能		96	0.472	1 584.511
双蓄电池组储能	A1	13	1.139	810.826
	A2	11	1.152	
	A3	15	1.081	
	B1	11	1.263	
	B2	11	1.277	
	B3	11	1.272	

6　结论

本文针对储能平抑风电波动过程中充放电切换频率高、寿命低的问题提出1种基于双蓄电池组混合储能的平抑策略，经仿真分析，得出如下结论。

(1)利用模糊控制对超级电容和蓄电池的功率及SOC进行优化，可以保证储能平抑能力，防止SOC越限，且可以保证双蓄电池组充放电平衡。

(2)利用功率分配策略对各储能单元进行功率调整，可以保持各单元SOC趋于一致，保证系统稳定运行。

(3)在相同的储能初期投资成本下，相较于传统混合储能控制策略，本文所提双蓄电池组混合储能控制策略具有更长的使用寿命和更高的经济性。

参考文献：

[1] 李志强, 李赛, 王凡凯. 平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略[J]. 现代电力, 2020, 37(6): 646-653.
Li Zhiqiang, Li Sai, Wang Fankai. Adaptive control strategy of hybrid energy storage system for mitigating wind power fluctuations [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(6): 646-653. (in Chinese)

[2] 刘仲民, 齐国愿, 高敬更, 等. 基于自适应 VMD 的混合储能容量优化配置研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 75-81.
Liu Zhongmin, Qi Guoyuan, Gao Jinggeng, et al. Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity based on adaptive VMD [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(4): 75-81. (in Chinese)

[3] 汤旻安, 刘锡麟. 基于二阶变滤波时间常数的微网混合储能功率分配策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(4):

550-557.

Tang Min'an, Liu Xilin. Hybrid energy storage power allocation strategy for microgrid based on second-order variable filter time constant [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(4): 550-557. (in Chinese)

[4] Deng Hao, Zhang Yingchao, Li Cui, et al. A smoothing strategy for hybrid storage based on EEMD and two-level fuzzy control [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2354(1): 012018.

[5] Wang Peng, Zhang Fuhua, Chen Qinghui. Bi-level optimal configuration of hybrid energy storage for wind farms considering battery life [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2247(1): 012005.

[6] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.

Feng Lei, Yang Shulian, Xu Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 44-50. (in Chinese)

[7] 谢超, 张建文, 李星. 基于 EEMD 与模糊控制的混合储能控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 124-129.

Xie Chao, Zhang Jianwen, Li Xing. Hybrid energy storage control strategy based on EEMD and fuzzy control [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 124-129. (in Chinese)

[8] 刘宇凝, 王迎丽, 徐明文, 等. 基于数字孪生混合储能的风电功率波动平抑策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2503-2513.

Liu Yuning, Wang Yingli, Xu Mingwen, et al. Wind power fluctuation smooth strategy based on digital twin hybrid energy storage [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2503-2513. (in Chinese)

[9] Wu Tiezhou, Shi Xiao, Liao Li, et al. A capacity configuration control strategy to alleviate power fluctuation of hybrid energy storage system based on improved particle swarm optimization [J]. Energies, 2019, 12(4): 642.

[10] Jannati M, Hosseinian S H, Vahidi B, et al. Mitigation of windfarm power fluctuation by adaptive linear neuron-based power tracking method with flexible learning rate [J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(6): 659-669.

[11] Chen Min, Zhang Jian. Research on control strategy of battery-supercapacitor hybrid energy storage system based on droop control [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2021, 16(4): 1377-1383.

[12] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 251-261.

Cheng Yuming, Meng Gaojun, Jia Peng, et al. Optimal hybrid energy storage capacity configuration method for mitigating fluctuations of wind power [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 251-261. (in Chinese)

[13] 贾鹏飞, 李卫国, 高兴军, 等. 平抑风电功率波动的电池储能系统模糊控制方法[J]. 现代电力, 2014, 31(3): 7-11.

Jia Pengfei, Li Weiguo, Gao Xingjun, et al. Fuzzy logic control of battery energy storage system for smoothing wind power fluctuation [J]. Modern Electric Power, 2014, 31(3): 7-11. (in Chinese)

[14] 林莉, 林雨露, 谭惠丹, 等. 计及 SOC 自恢复的混合储能平抑风电功率波动控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 658-671.

Lin Li, Lin Yulu, Tan Huidan, et al. Hybrid energy storage control with SOC self-recovery to smooth out wind power fluctuations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 658-671. (in Chinese)

[15] Chankaya M, Hussain I, Ahmad A. Seamless control of grid-tied PV-hybrid energy storage system [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2021, 22(5): 569-582.

[16] 马兰, 谢丽蓉, 叶林, 等. 多目标多工况双储能协同运行策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 38-48.

Ma Lan, Xie Lirong, Ye Lin, et al. Cooperative operation strategy of dual energy storage under multiple objectives and multiple operation conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 38-48. (in Chinese)

[17] 凌开元, 赵乐冰, 张新松, 等. 基于双储能系统的主动配电网储能配置[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 171-176.

Ling Kaiyuan, Zhao Lebing, Zhang Xinsong, et al. Storage allocation of active distribution network based on double-storage system [J]. Electric Power Automation

Equipment, 2018, 38(5): 171-176. (in Chinese)

[18] 罗毅，李达. 电池储能平抑风电功率波动的预测控制方法[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(11): 1-5, 11.
Luo Yi, Li Da. A model predictive control method of battery energy storage for smoothing wind power fluctuation [J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(11): 1-5, 11. (in Chinese)

[19] 卢芸，徐骏. 基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 149-154.
Lu Yun, Xu Jun. Wind power hybrid energy storage capacity configuration based on wavelet packet decomposition [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 149-154. (in Chinese)

[20] 孙玉树，张国伟，唐西胜，等. 风电功率波动平抑下的 MPC 双储能控制策略研究[J]. 电工技术学报，2019, 34(3): 571-578.
Sun Yushu, Zhang Guowei, Tang Xisheng, et al. Research on MPC and daul energy storage control strategies with wind power fluctuation mitigation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 571-578. (in Chinese)

[21] 曾雪彤. 基于平抑风电波动的混合储能配置研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
Zeng Xuetong. Research on hybrid energy storage allocation based on smoothing wind power fluctuation [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)

[22] 高飞，杨凯，惠东，等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 41-45, 8.
Gao Fei, Yang Kai, Hui Dong, et al. Cycle-life energy analysis of $LiFePO_4$ batteries for energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 41-45, 8. (in Chinese)

[23] 韩晓娟，程成，籍天明，等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报，2013, 33(34): 91-97, 16.
Han Xiaojuan, Cheng Cheng, Ji Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97, 16. (in Chinese)

[24] 何俊强，师长立，马明，等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备，2020, 40(7): 157-167.
He Junqiang, Shi Changli, Ma Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 157-167. (in Chinese)



王利民

作者简介：

王利民(1997—)，男，中国电源学会学生会员，硕士。研究方向：新能源发电与并网控制。E-mail：154004890@qq.com。

程静(1980—)，女，通信作者，博士，副教授。研究方向：高比例新能源并网控制技术。E-mail：157511515@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)