

基于变分模态分解-模糊控制的混合储能系统 SOC 控制策略

刘吉庆, 赵景波*, 侯睿

(青岛理工大学 信息与控制工程学院, 青岛 266525)

摘要: 针对风力发电随机性和间歇性引起的风电功率不稳定问题, 以及混合储能系统 (HESS) 在风电功率补偿上的技术挑战, 提出了一种基于变分模态分解 (VMD)-模糊控制的混合储能系统荷电状态 (SOC) 控制策略, 以提高风电功率的输出稳定性并延长混合储能系统的使用寿命。采用秘书鸟优化算法 (SBOA) 优化的 VMD 对风电功率进行初次分配。基于锂电池平均 SOC 及其参考 SOC 的偏差, 进行模糊控制以修正初始分配功率。利用 MATLAB/Simulink 对控制策略进行仿真。仿真结果验证了所提出的控制策略在削弱风电输出波动性方面的有效性, 能够实现较为平稳的并网功率输出, 并使锂电池 SOC 保持在正常范围内, 避免锂电池群体进入 SOC 非健康区域。

关键词: 储能技术; 变分模态分解; 模糊控制; 风电混合储能系统; 能量管理策略

中图分类号: TK82; TK89 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2025)06-0114-09

SOC control strategy for hybrid energy storage system based on variational mode decomposition and fuzzy control

LIU Jiqing, ZHAO Jingbo*, HOU Rui

(School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The instability of wind power caused by its randomness and intermittency, as well as the technical challenges of power compensation in hybrid energy storage system (HESS), are significant issues. A state of charge (SOC) control strategy for hybrid energy storage system based on variational mode decomposition (VMD) and fuzzy control is proposed to enhance the stability of wind power output and prolong the service life of the hybrid energy storage system. The VMD optimized by the secretary bird optimization algorithm (SBOA) is used for the initial power allocation of wind power. Fuzzy control is applied to adjust the initial power allocation by considering the deviation between the average SOC of the lithium battery and its reference SOC. The control strategy is simulated by using MATLAB/Simulink. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy in mitigating the fluctuations of wind power output. It enables relatively smooth grid-connected power output and ensures that the SOC of the lithium battery operates within the normal range, thereby preventing the battery group from entering unhealthy SOC regions.

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2022ME182)

作者简介: 刘吉庆 (1996—), 男, 山东蒙阴人。硕士, 研究方向为电力电子与控制。E-mail: liujiqing6666@163.com。

* 通信作者: 赵景波 (1971—), 男, 山东东平人。博士, 教授, 主要从事控制理论与机器人工程方面的研究。
E-mail: zhaojingbo6666@163.com。

Key words: energy storage technology; variational mode decomposition; fuzzy control; wind power hybrid energy storage system; energy management strategy

传统大电网发电主要依赖火力发电,不仅造成环境污染,而且随着化石燃料的日益枯竭,发电成本持续上升。为应对环境污染和发电成本的问题,人们开始积极探索更加清洁、经济性更高的可再生能源。可再生能源接入微电网,带来了显著的经济和环境效益。风能是一种技术较为成熟的可再生能源,风力发电已成为极具发展前景的发电方式。随着全球风电普及,风电对电网的渗透率不断增加,其随机性、波动性和间歇性对电网的稳定性和安全性构成了重大威胁^[1-2]。为了应对这一挑战,通过储能装置平抑复杂的风电波动来提高风电并网的稳定性,混合储能系统(HESS)提供了一种解决方案^[3]。由于储能单元初始荷电状态(SOC)、制造工艺精度以及老化程度等方面存在差异,可能导致部分储能单元出现过充放电,从而触发保护机制而退出运行。这不仅影响储能系统的整体协调性,还会加重其他储能单元的运行负担,降低储能系统效率^[4-5]。因此,需要对储能单元进行功率初始分配和二次分配,确保各储能单元工作在 SOC 安全范围内,以实现 HESS 的高效稳定运行。

在储能功率分配中,低通滤波法^[6]虽然实现简单,但频域分辨率较低,难以满足高性能控制的要求;傅里叶分解^[7]和小波包分解^[8]依赖于预设的基函数,难以自适应非平稳信号;滑动平均滤波^[9]则存在频率选择性差、处理非平稳信号效果有限等问题。DRAGOMIRETSKIY 等^[10]提出的变分模态分解(VMD)滤波方法,作为一种自适应且完全非递归的滤波技术,具备模态分离清晰、对非线性和非平稳信号的适应性强、噪声鲁棒性高等显著优势。李建林等^[11]基于 VMD 滤波实现 HESS 的初始功率分配,有效提升了储能单元的功率平抑能力,延长了 HESS 的使用寿命,并进一步增强了风电功率的平抑效果。

储能系统的二次分配可分为线性控制和非线性控制两类。在线性控制中,比例-积分(PI)控制器因鲁棒性较差、适用范围有限而较少被应用。非线性控制方法包括滞环控制、滑模控制、反步设计、反馈线性化、神经网络控制、能量成型控制等,其中,滞环控制^[12]由于开关频率随机,增加了滤波难度;滑模控制^[13]存在稳态抖动且设计较为复杂;反步设计^[14]运算量大,难以满足实时应用需求;反馈线性化^[15]对模型精度要求较高,鲁棒性不足;神经网络控制^[16]难以实现在线控制;能量成型控制^[17]算法复杂,响应速度受限。国珍等^[18]利用模糊控制有效提升了光伏发电的稳定性;CAO 等^[19]提出了一种基于模糊控制的方法,在综合考虑储能单元 SOC 的前提下,实现了混合储能系统对风电功率波动的有效抑制。模糊控制无需依赖数学模型,具备较好的鲁棒性和自适应性,是一种较优的控制选择。

综上所述,本文提出了一种结合变分模态分解与模糊控制技术的混合储能系统荷电状态(SOC)控制策略。该策略通过优化 VMD 实现初始功率分配,并利用模糊控制算法进行精细调整,使储能单元的 SOC 保持在健康范围内。

1 基本原理

1.1 平均一致性算法

在多代理网络建模中通常用有向图或无向图来描述系统的通信网络。将图 1 中每个节点视为多代理 $N_i (i=1,2,3,4)$, 每条边视为相邻代理之间信息交流的通路 $E_{ij} (i=1,2,3,4; j=1,2,3,4)$, 并将属于智能体 i 的邻居集合表示为 $N_i = \{j | \{i, j\} \in E\}$ 。

所有智能体的状态 $S_i(k)$ 可以用向量 $\mathbf{S}(k) \in \mathbf{R}^N$ 表示,其中 $\mathbf{S}(0)$ 包含了所有智能体的初始状态,因此所描述的迭代过程可以表示为^[20]

$$S_i(k+1) = Z_i + \mu \sum_{j \in N_i} \xi_{ij}(k+1) \quad (1)$$

$$\xi_{ij}(k+1) = \xi_{ij}(k) + S_j(k) - S_i(k) \quad (2)$$

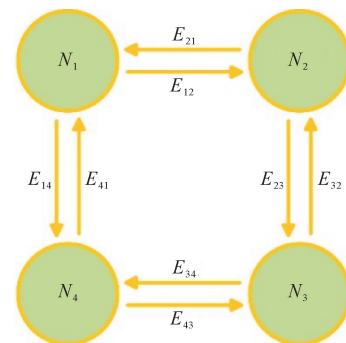


图 1 多智能体网络拓扑结构

式中: $S_i(k+1)$ 为智能体 i 在第 $k+1$ 次迭代时的荷电状态; Z_i 为智能体 i 初始时刻的荷电状态; μ 为标量调节参数; $\xi_{ij}(k)$ 为智能体 i 与其相邻智能体 j 在第 k 次迭代时的荷电状态累计量, 其中 $\xi_{ij}(0)$ 对所有 i 和 j 均为 0。

当某个智能体从网络中脱离时, 其所有邻居仅需将与其相关的 ξ_{ij} 均设为 0, 就可以有效抵消该智能体对系统状态的影响。在此机制下, 整个网络在去除该智能体后, 仍可收敛至其余智能体荷电状态 Z_i 的平均值, 从而保持系统的稳定性与鲁棒性。因此, 即使拓扑发生变化, 该算法也会收敛到网络上合适的平均数量。

1.2 变分模态分解(VMD)

由于混合储能装置的功能不同, 引入变分模态分解技术对原始风电信号进行分解, 在得到高低频功率的同时, 也能得到满足并网要求的并网功率。该方法的变分约束模型如式(3)所示^[21]:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k = f(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: K 为分解的模态数; $\{u_k\}$ 为所有模态函数之和; $\{\omega_k\}$ 为中心频率集合; ∂_t 为函数对时间 t 的导数; $\delta(t)$ 为狄利克雷分布函数; $*$ 为卷积符号; $\|\cdot\|_2^2$ 为函数的 L^2 范数的平方; $f(t)$ 为被分解的原始信号。

通过引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘子 $\lambda(t)$, 可将式(3)转化为等价的无约束变分问题, 并采用交替方向乘子法对其进行最优解求解。具体形式如下所示:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (6)$$

式中: $\hat{f}(\omega)$ 、 $\hat{u}(\omega)$ 、 $\hat{\lambda}(\omega)$ 分别为 $f(\omega)$ 、 $u(\omega)$ 、 $\lambda(\omega)$ 的傅里叶变换; n 为迭代次数; $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 为第 k 个模态分量在 $n+1$ 次迭代中的频域表示; ω_k^{n+1} 为第 k 个模态分量在第 $n+1$ 次迭代中的中心频率; τ 为正的步长因子, $\tau > 0$ 。

1.3 秘书鸟优化算法(SBOA)

第 1 阶段是秘书鸟的狩猎策略(探索阶段), 将狩猎过程分为 3 个相等的时间间隔, 增强了算法的多样性和全局搜索的能力。第 1 阶段的位置更新公式如下所示^[22]:

$$X_{i,j}^{\text{new,Pl}} = \begin{cases} X_{i,j} + (X_{\text{random}_1} - X_{\text{random}_2}) \times R_1 & (t \leq \frac{1}{3}T) \\ X_{\text{best}} + e^{\frac{t}{T}} \times (R_B - 0.5) \times (X_{\text{best}} - X_{i,j}) & (\frac{1}{3}T < t \leq \frac{2}{3}T) \\ X_{\text{best}} + (1 - \frac{t}{T})^{2 \times \frac{t}{T}} \times X_{i,j} \times R_L & (t > \frac{2}{3}T) \end{cases} \quad (7)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{\text{new,Pl}} & (F_i^{\text{new,Pl}} < F_i) \\ X_i & (F_i^{\text{new,Pl}} \geq F_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $X_{i,j}$ 为第 i 只秘书鸟在 j 维问题上的一个变量值; $X_{i,j}^{\text{new,Pl}}$ 为第 1 阶段第 i 只秘书鸟在第 j 维的新位置; X_{random_1} 和 X_{random_2} 均为迭代的随机候选解; X_{best} 为秘书鸟历史上的最佳位置; X_i 为第 i 只秘书鸟的当前位置; R_1 为区间 $[0, 1]$ 中随机生成的 $1 \times j$ 维数组; R_B 为从标准正态分布中随机生成的 $1 \times j$ 维数组;

R_L 为 levy 飞行策略; F_i 为第 i 只秘书鸟获得的目标函数值; $F_i^{\text{new},P1}$ 为第 1 阶段第 i 只秘书鸟获得的目标函数新值; t 和 T 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

第 2 阶段是秘书鸟的逃生策略(开发阶段), 2 种逃生策略都可以用式(9)表示。第 2 阶段的位置更新公式如下所示:

$$X_{i,j}^{\text{new},P2} = \begin{cases} X_{\text{best}} + (2 \times R_B - 1) \times (1 - \frac{t}{T})^2 \times X_{i,j} & (r < 0.5) \\ X_{i,j} + R_2 \times (X_{\text{random}} - K \times X_{i,j}) & (r \geq 0.5) \end{cases} \quad (9)$$

$$X_i = \begin{cases} X_{i,j}^{\text{new},P2} & (F_i^{\text{new},P2} < F_i) \\ X_i & (F_i^{\text{new},P2} \geq F_i) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $X_{i,j}^{\text{new},P2}$ 为第 2 阶段第 i 只秘书鸟在第 j 维的新位置; $F_i^{\text{new},P2}$ 为第 2 阶段第 i 只秘书鸟获得的目标函数新值; R_2 为从正态分布随机生成的 $1 \times j$ 维数组; X_{random} 为当前迭代的随机候选解; K 为 1 或 2 的随机值。

2 SBOA-VMD 功率一次分配

用 SBOA 算法搜索 VMD 分解最优参数时, 需确定一个适应度函数, 用来评价寻优参数是否最优。计算方式如下^[23]:

$$\langle \hat{k}, \hat{\alpha} \rangle = \underset{(k, \alpha)}{\text{argmin}} \left\{ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E_p(i) \right\} \quad (11)$$

$$E_p(i) = - \sum_{i=1}^N p_i \lg p_i \quad (12)$$

$$p_i = \frac{a(i)}{\sum_{i=1}^N a(i)} \quad (13)$$

式中: \hat{k} 为 VMD 分解信号时的最优模态个数; $\hat{\alpha}$ 为 VMD 分解信号时的最优惩罚因子; $\langle \hat{k}, \hat{\alpha} \rangle$ 为最佳参数组合; $E_p(i)$ 为每个模态分量经希尔伯特解调后的包络熵; i 为采样点数; p_i 为 $a(i)$ 的归一化形式; $a(i)$ 为包络信号。

式(11)–(13)定义了平均包络熵函数, 其最小值作为寻优目标, 从而得到最优参数对 $\langle \hat{k}, \hat{\alpha} \rangle$ 。根据获得的最优 VMD 参数, 对风电功率信号进行分解。对于低于分界频率的模态功率, 首先计算其并网波动量, 若波动量满足并网标准, 则该部分功率直接并网; 其余不满足标准的模态功率由锂电池进行平抑。对于高于分界频率的模态功率, 则由超级电容承担平抑任务。基于上述策略, 可得到风电功率的初次分配流程, 如图 2 所示, 其中 P_G 表示并网功率, P_{HESS} 表示锂电池与超级电容平抑功率之和, 即混合储能系统的总平抑功率。

3 模糊控制功率二次分配

由于储能单元在安装容量、老化程度及制造工艺等方面存在差异, 可能导致 SOC 较低的储能单元率先完成放电, 从而加速锂电池的性能退化并缩短其使用寿命。因此, 非等容条件下的 SOC 均衡控制对于保障系统运行寿命具有重要意义。控制结构如图 3 所示, 其中 P_{wind} 为风电功率; P_G 为并网功率; P_{re} 为锂电池与超级电容储能系统间的调节功率; P_{SC} 和 P_{Bat} 分别为超级电容和锂电池的平抑功率; S_m 为锂电池的平均 SOC; S_{ref} 为锂电池的参考 SOC, 取值为 50% 的 SOC; S_i 为第 i 个锂电池当前 SOC。

储能单元的功率输出由功率调节器和 PWM 控制器产生的脉冲信号驱动三相逆变器控制。模糊控制器用于调节超级电容组与锂电池组的目标平抑功率, 输入为 S_i 以及 $S_m - S_{\text{ref}}$ 。 S_i 经缩放后的定义域为 $[1, 4]$, 模糊控制集为 $\{V_S, M_S, M_B, V_B\}$, 分别代表{很小, 中等偏小, 中等偏大, 很大}; $S_m - S_{\text{ref}}$ 经缩放后的定义域为 $[-1, 1]$, 模糊控制集为 $\{N_L, N_S, P_S, P_L\}$, 分别代表{负大, 负小, 正小, 正大}。模糊控制器输

出为变量 K_{SOC} , K_{SOC} 经缩放后的定义域为 $[-2, 2]$, 模糊控制集为 $\{N_L, N_S, P_S, P_L\}$ 。模糊控制规则如表 1 所示。

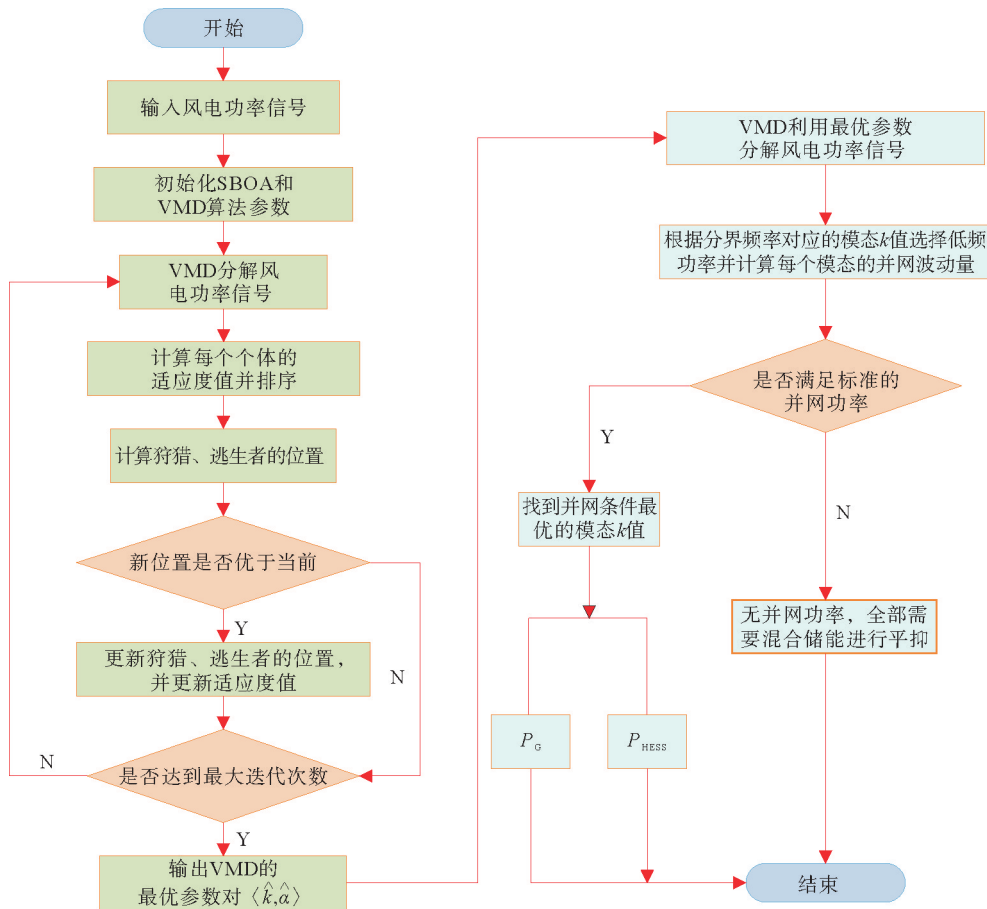


图 2 混合储能系统功率初始分配流程

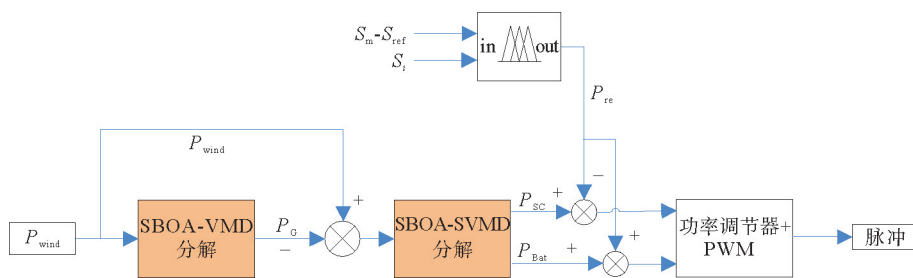


图 3 基于模糊控制的功率二次分配策略

以锂电池模糊控制的优化过程为例, 图 4 展示了模糊控制器的输入隶属度函数以及输入变量与输出变量之间的三维映射关系。

功率的二次分配过程引进了全局变量 S_m , 以减弱领导者 SOC 的作用, 避免因领导者退出工作而影响整体性能。根据 S_m 与 S_{ref} 之间的偏差 $S_m - S_{ref}$ 对混合储能系统的功率输出进行动态修正。在修正过程中, 当锂电池

表 1 模糊控制规则

S_i	$S_m - S_{ref}$			
	N_L	N_S	P_S	P_L
V_S	P_L	P_L	P_S	P_S
M_S	P_S	P_S	N_S	N_S
M_B	N_S	N_S	N_L	N_L
V_B	N_L	N_L	N_L	N_L

工作在 SOC 正常范围内时,控制器根据锂电池当前 SOC 和 S_m 与 S_{ref} 之间的偏差,对锂电池和超级电容的参考功率进行相应调整。最终使锂电池趋近于 S_{ref} ,从而避免因个别电池过充或过放而退出系统,保障整体系统的稳定运行。该机制的核心目标是通过动态调节 SOC,使锂电池始终维持在设定的安全运行区间内。

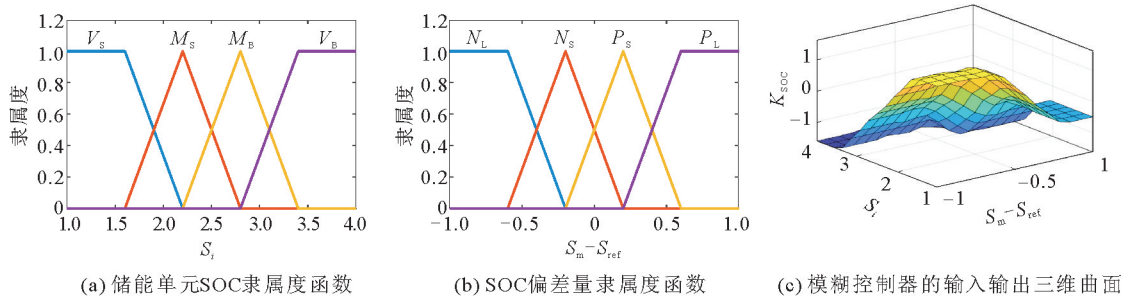


图 4 模糊控制系统的输入隶属度与输出响应特性

4 实验验证

4.1 基础数据

本文选用中国西北地区的 1 min 风电数据,风电场装机容量 1.5 MW,共采样 2000 个数据点。在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,为了减少仿真时长,设置风电功率数据的时间间隔为 0.05 s,图 5 为原始采样的风电功率数据。风电并网波动量限值设定为 10 min 内不超过 110 kW。SBOA 算法的迭代次数设为 20 次,种群规模为 25 个个体。图 5 利用参数 $\langle \hat{k}, \hat{\alpha} \rangle$ 对风电功率信号进行 VMD 分解,并根据频率阈值 10^{-3} Hz 对 VMD 分解模态数量进行划分,确定储能系统的参考功率。混合储能系统的参数配置如表 2 所示。

图 6 给出了由 VMD 分解得到的低频率中各模态分量的波动量,其中 IMF1 的功率波动低于并网波动限制值(110 kW),因此被选为并网功率分量。平抑前后的并网功率波动量如图 7 所示,结果表明,并网功率波动显著低于原始风电功率波动,满足并网稳定性要求。混合储能系统中锂电池和超级电容的初次分配平抑功率如图 8 和图 9 所示,通过对比可以看出,锂电池的功率波动幅度较大但变化相对平缓,而超级电容的功率波动幅度较小但变化较为剧烈,这与 2 种储能单元各自的动态响应特性和能量密度特性相符合,验证了功率分配策略的合理性。

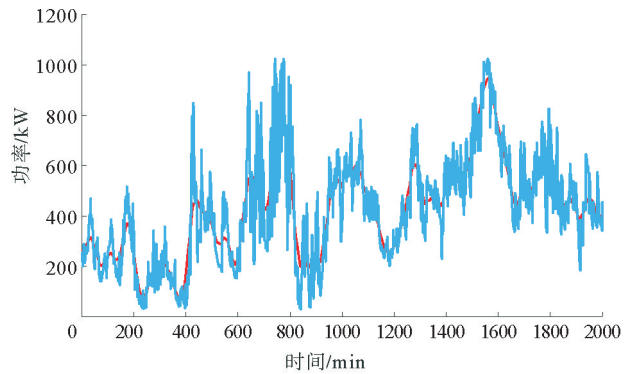


图 5 并网功率与原始风电功率
— 并网功率; — 原始风电功率

表 2 储能单元参数

储能单元	P_{max}/kW	$C_{rate}/(kW \cdot h)$	$S_0/\%$	$S_L/\%$	$S_U/\%$
LI1	112	80	50.00	20	80
LI2	120	85	21.50	20	80
LI3	120	70	20.50	20	80
LI4	112	70	20.25	20	80
SC1	100	40	50.00	10	90
SC2	110	45	10.16	10	90
SC3	110	50	10.13	10	90
SC4	110	40	10.07	10	90

注:LI 和 SC 分别为锂电池和超级电容元件; P_{max} 为储能元件的最大充放电功率; C_{rate} 为额定容量; S_0 为初始荷电状态; S_L 为储能元件安全荷电状态的下限; S_U 为储能元件安全荷电状态的上限。

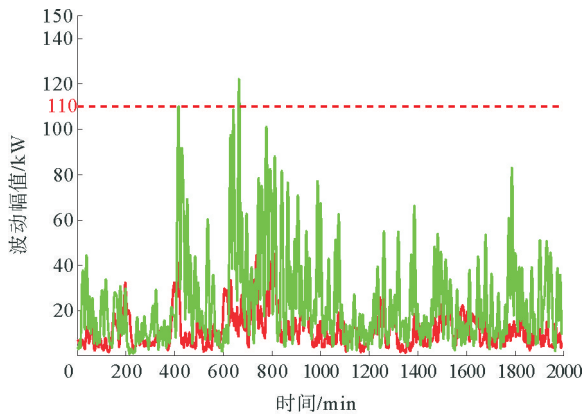


图6 VMD功率分解的低频功率波动量
— IMF1波动; — IMF2波动; - - - 并网波动限值

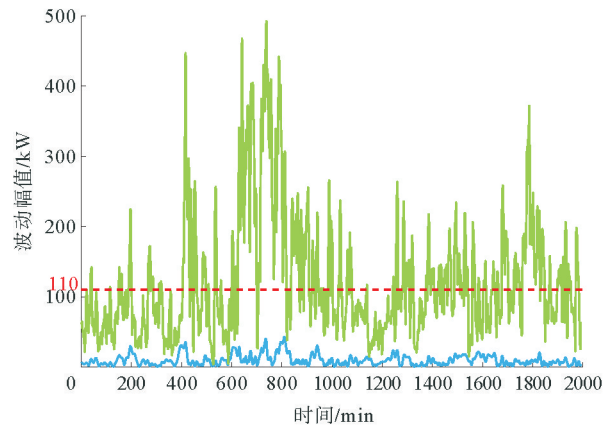


图7 并网功率与原始风电功率波动量
— 并网功率波动; — 原始风电功率波动; - - - 并网波动限值

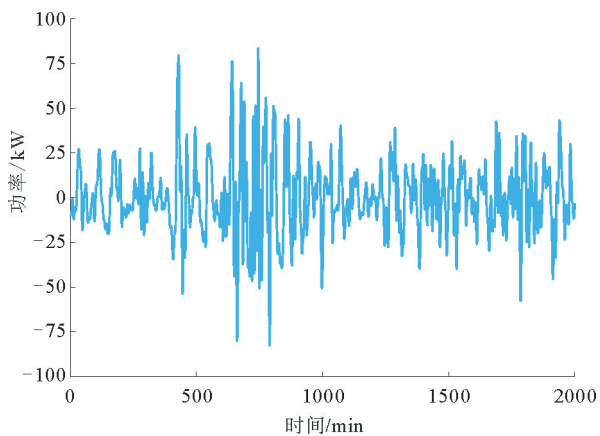


图8 单个锂电池初次分配平抑功率

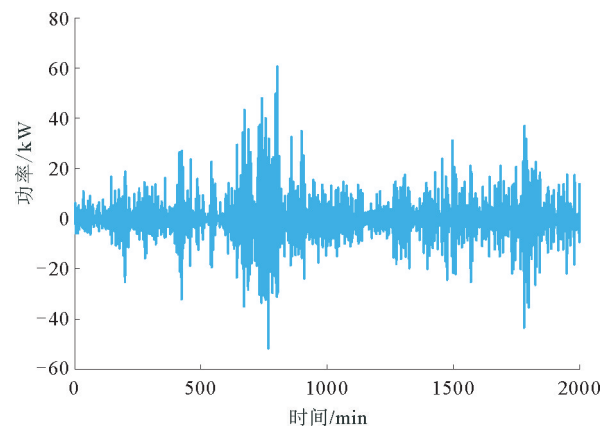


图9 单个超级电容初次分配平抑功率

初始功率分配结果显示,VMD对原始风电信号的分解在抑制波动性方面具有显著效果,进而提升了风电功率的并网质量。同时,功率分配结果表明,锂电池系统主要承载低频、较为平稳的功率部分,而超级电容则响应高频、频繁变化且幅值较大的功率部分,锂电池与超级电容在功率分配中与其各自动态响应特性和能量密度特性之间契合良好。

4.2 功率二次分配

由于一次分配功率不精确以及储能单元间的差异,容易出现储能单元SOC越线退出工作,增加其他储能单元的负担,最终导致储能系统群体退出工作,因此,使储能单元工作在SOC安全范围十分重要。在 S_m 与 S_{ref} 的偏差作用下,利用模糊控制调整储能单元的平抑功率,使其工作在SOC安全范围。

锂电池和超级电容初始分配功率和二次分配功率对比如图10和图11所示。锂电池在2种功率分配策略下的SOC变化情况如图12所示,结果表明,在未进行二次分配功率调整的情况下,3组锂电池的SOC容易低于设定的下限值(如20%),存在过放风险。而在应用二次分配功率策略后,SOC可稳定维持在设定的安全运行区间内,有效避免了过充和过放现象的发生。

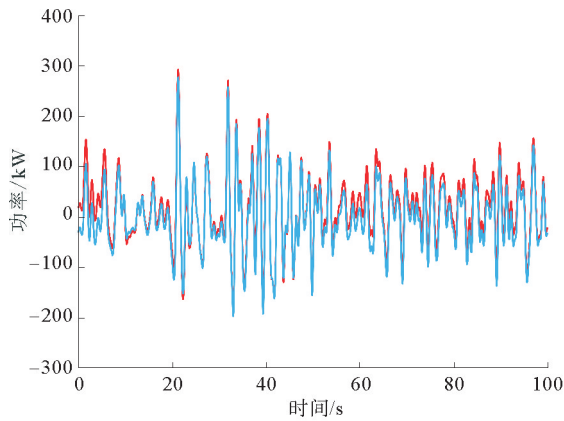


图 10 锂电池储能系统功率分配对比
— 二次分配功率; — 初始分配功率

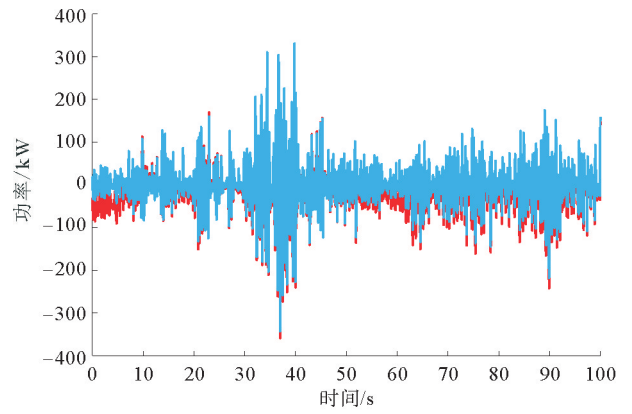


图 11 超级电容储能系统功率分配对比
— 二次分配功率; — 初始分配功率

在模糊控制策略的作用下,参考功率与跟踪功率对比如图 13 所示,其中,参考功率代表理想状态下的目标输出,而跟踪功率为混合储能系统经平抑处理后的并网功率输出。如图 14 所示,跟踪功率的波动幅度始终远低于 110 kW,表明该控制策略能够有效抑制风电功率波动,满足并网功率稳定性要求。

功率二次分配策略有效修正了混合储能系统中 SOC 超限的问题,确保储能单元在安全范围内稳定运行;同时,并网功率波动得到了一定的抑制,从而有助于延长储能设备的使用寿命,并提升风电并网的电能质量。

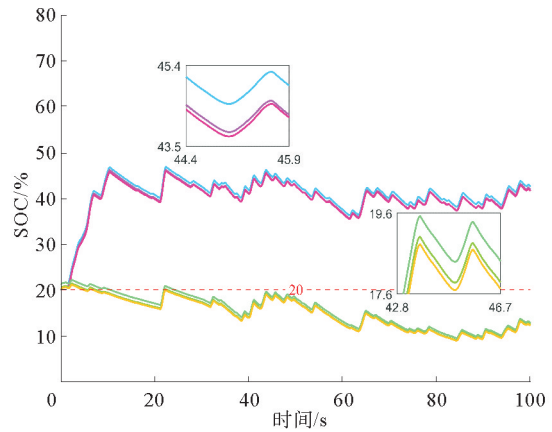


图12 锂电池SOC变化

— 二次功率分配SOC1变化; — 二次功率分配SOC2变化;
— 二次功率分配SOC3变化; — 初次功率分配SOC1变化;
— 初次功率分配SOC2变化; — 初次功率分配SOC3变化; - - - SOC限值

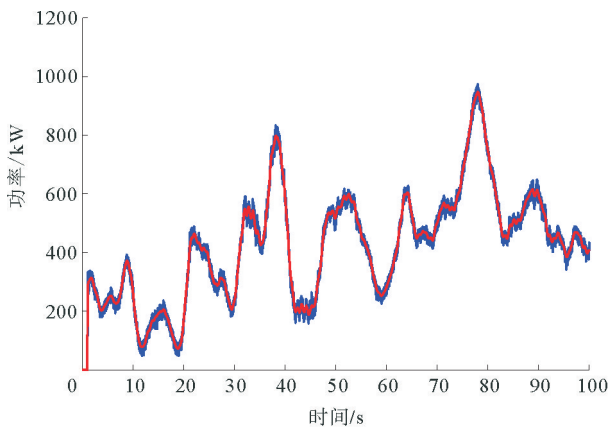


图 13 参考功率与跟踪功率对比
— 跟踪功率; — 并网参考功率

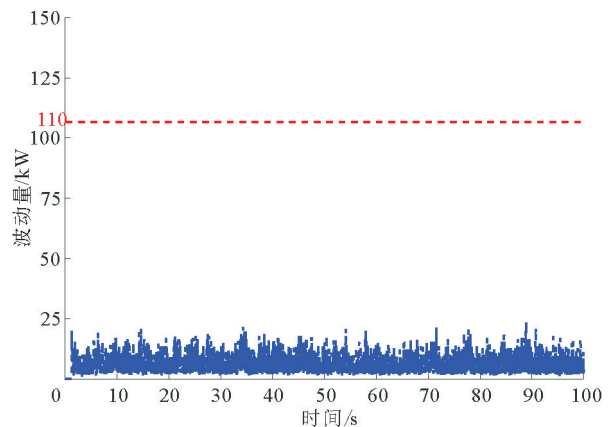


图 14 实际并网功率波动
- - - 实际并网功率波动; - - - 并网波动限值

5 结束语

基于秘书鸟优化算法(SBOA)优化的变分模态分解(VMD)方法,可将风电功率信号分解为并网功率和储能单元平抑功率两部分,从而充分发挥不同储能装置的性能优势,有助于实现风电功率的稳定输出,并延长储能系统的使用寿命。此外,利用平均一致性算法,通过各智能体间“邻里通信”得到全局平均荷电状态(SOC),针对锂电池的平均SOC与参考SOC之间的偏差 $S_m - S_{ref}$,采用模糊控制策略对混合储能系统中易发生的过充过放问题进行动态调整。在控制过程中,通过调节锂电池的充放电功率,确保其荷电状态始终处于设定的合理运行范围内。然而,由于SBOA和VMD算法复杂程度较高,可能引入一定的时延,限制了其在对实时性要求较高系统中的应用,目前主要适用于离线控制场景。未来可进一步优化算法结构,以降低时延,提高其在实时控制系统中的实用性和响应速度。

参考文献(References):

- [1] 乔亮波,张晓虎,孙现众,等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(1):98-106.
QIAO Liangbo,ZAHNG Xiaohu,SUN Xianzhong,et al. Advances in battery-supercapacitor hybrid energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(1):98-106.
- [2] 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.
- [3] MASIH-TEHRANI M,YAZDI M R H,ESFAHANIAN V,et al. Wavelet-based power management for hybrid energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2019,7:779-790.
- [4] CAO Y,QAHOUC J A A. Hierarchical SOC balancing controller for battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,68(10):9386-9397.
- [5] AKRAM U,KHALID M. A coordinated frequency regulation framework based on hybrid battery-ultracapacitor energy storage technologies[J]. IEEE Access,2017,6:7310-7320.
- [6] 陈亚爱,林演康,王赛,等. 基于滤波分配法的混合储能优化控制策略[J]. 电工技术学报,2020,35(19):4009-4018.
CHEN Yaai,LIN Yankang,WANG Sai,et al. Optimal control strategy of hybrid energy storage based on filter allocation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(19):4009-4018.
- [7] MOHAMMADI E,RASOULINEZHAD R,MOSCHOPOULOS G. Using a supercapacitor to mitigate battery microcycles due to wind shear and tower shadow effects in wind-diesel microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(5):3677-3689.
- [8] KHOSRAVI M,AFSHARAIN S,FARHANGI S. Optimal sizing and technology selection of hybrid energy storage system with novel dispatching power for wind power integration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,127:106660.
- [9] LI L,CAO Y P,KONG X Y,et al. Hybrid energy storage system control and capacity allocation considering battery state of charge self-recovery and capacity attenuation in wind farm[J]. Journal of Energy Storage,2024,75:109693.
- [10] DRAGOMIRETSKIY K,ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2013,62(3):531-544.
- [11] 李建林,孙浩元,赵文鼎,等. 基于变分模态分解-多模糊控制的风电混储系统功率分配策略[J]. 上海交通大学学报,2025,59(10):1498-1509.
LI Jianlin,SUN Haoyuan,ZHAO Wending,et al. Power allocation strategy for wind power hybrid storage system based on variational modal decomposition-multi-fuzzy control[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2025,59(10):1498-1509.
- [12] 李彦林,王明彦,郑载满. 微网运行条件下储能并网VSC多目标控制策略[J]. 电网技术,2013,37(7):1792-1798.
LI Yanlin,WANG Mingyan,ZHENG Zaiman. A multi-objective control strategy for grid-connecting VSC under grid-connected operation of microgrid[J]. Power System Technology,2013,37(7):1792-1798.
- [13] ABIANEH A J,FERDOWSI F. Sliding mode control enabled hybrid energy storage system for islanded dc microgrids with pulsing loads[J]. Sustainable Cities and Society,2021,73:103117.
- [14] ROY T K,GHOSH S K,SAHA S. Stability enhancement of battery energy storage and renewable energy-based hybrid AC/DC microgrids using terminal sliding mode backstepping control approaches[J]. ISA Transactions,2023,142:40-56.
- [15] ZHANG Y J,WANG J,LI H,et al. Dynamic performance improving sliding-mode control-based feedback linearization for PV system under LVRT condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(11):11745-11757.