

考虑预测误差与功率波动的光储系统混合储能容量优化配置

郭倍源, 尹雁和, 阮志杰, 周桂, 刘劲, 卢小海, 阮大兵

(广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400)

摘要: 由蓄电池和超级电容器组成的 HESS(混合储能系统)可以有效减小光伏出力随机性和波动性对并网的影响。为补偿预测误差与平抑波动, 提出一种基于 ICPO-VMD-HT(改进的冠豪猪优化-变分模态分解-希尔伯特变换)算法的混合储能容量优化配置方法。首先, 以量化的功率预测误差与波动允许带宽建立综合目标域。然后, 结合 ICPO-VMD 参数, 并采用 HT 实现综合目标域内外功率的精准解析, 进而分配低频与高频分量至蓄电池和超级电容器。最后, 建立年综合成本经济模型, 以河北某光伏电站实际数据为例验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 光储系统; 混合储能; 容量配置; 功率预测; 冠豪猪优化算法; 变分模态分解; 希尔伯特变换

DOI: 10.19585/j.zjdl.202603012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimal capacity configuration of hybrid energy storage for PV-storage system considering prediction errors and power fluctuations

GUO Beiyuan, YIN Yanhe, RUAN Zhijie, ZHOU Gui, LIU Jin, LU Xiaohai, RUAN Dabing

(Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528400, China)

Abstract: A hybrid energy storage system (HESS) composed of batteries and supercapacitors can effectively mitigate the impact of photovoltaic (PV) output randomness and fluctuation on grid connection. To compensate for prediction errors and suppress power fluctuations, this paper proposes a hybrid energy storage capacity optimization method based on the improved crested porcupine optimizer, variational mode decomposition, and Hilbert transform (ICPO-VMD-HT) algorithm. Firstly, a comprehensive target domain is established based on quantified power prediction errors and an allowable fluctuation bandwidth. Then, leveraging the parameters of the ICPO and VMD, the HT is employed to achieve precise decomposition of the power components inside and outside this comprehensive target domain. Subsequently, the low-frequency and high-frequency power components are allocated to the batteries and supercapacitors, respectively. Finally, an economic model for the annual comprehensive cost is established. Case studies using actual data from a PV plant in Hebei Province verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

Keywords: photovoltaic-storage system; hybrid energy storage; capacity configuration; power prediction; CPO; VMD; HT

0 引言

为实现“双碳”目标, 我国积极推进能源结构转型。其中, 光伏发电作为清洁能源的核心组成部分, 在国内得到了广泛应用^[1]。然而, 光伏出力受到气象条件的影响, 表现出显著的波动性和随机性, 其大规模并网可能引发电网频率偏差及

电压失稳, 对电力系统的安全稳定运行造成威胁^[2-4]。

储能技术凭借快速功率调节能力成为平抑新能源波动的关键技术手段^[5-7]。储能按类型分为能量型和功率型^[8-10]: 以蓄电池为代表的能量型储能充放电时间长, 能量密度高, 但循环寿命短, 适用于平抑低频高能量功率波动; 以超级电容器为代表的功率型储能充放电时间短, 响应速度快, 但能量密度小, 可用于平抑低能量的高频波动。鉴于两种类型储能有良好的互补性, 将它们组成

HESS(混合储能系统), 可实现对不同频段功率波动的分层平抑, 兼具经济性与技术可行性^[11]。

目前, 针对HESS的容量优化研究主要集中于波动分解与成本建模方面。文献[12]采用CEEMDAN(完全集合经验模态分解)和HT(希尔伯特变换), 将光伏功率的波动量分解为高频和低频分量, 并针对频率特点, 分别由超级电容器和蓄电池进行平抑, 从而降低光伏并网对电网的影响。文献[13]提出一种基于小波包分解的混合储能容量配置策略, 以储能系统年均综合配置成本最低为目标函数, 实现HESS的容量优化配置, 该方法实现简单, 计算速度较快, 但存在一定的模态混叠, 无法实现自适应最优频带划分。文献[14-15]采用VMD(变分模态分解)算法对光伏功率进行分解, 并通过构建目标函数求解HESS的最优配置, 但算法参数仍需人为经验选择, 缺乏精确的理论依据。

为提高光储系统并网的可靠性, 综合考虑光伏预测和波动率尤为重要, 文献[16]提出基于注意力机制和LSTM(长短期记忆网络)的光伏功率预测模型, 并在此基础上根据光伏出力计划偏差建立储能优化配置模型。然而, 该方法未充分考虑光伏出力的波动性, 同时其经济成本模型未将储能系统的使用寿命纳入分析。文献[17]以实际功率和预测功率为依据制定目标域, 同时建立了功率分配的优化控制策略, 但未量化储能系统在全寿命周期内的综合成本。文献[18]通过概率统计分析制定补偿预测误差与平抑波动的目标域, 但未对目标域内外的经济性及储能容量优化进行深入分析。

本文在上述研究的基础上, 以光伏预测功率为基准, 提出考虑预测误差与平抑波动的混合储能优化配置方法。首先, 构建包括预测误差和波动率允许带宽的综合目标域; 然后, 利用由ICPO(改进的冠豪猪优化)算法、VMD和HT组合成的ICPO-VMD-HT算法实现功率信号精准频域解析; 最后, 建立HESS全寿命综合成本计算模型, 通过算例分析了本文方法在HESS容量配置经济性方面的优势。结果表明, 本文方法在平抑波动和功率预测误差的同时有效降低了年均综合成本, 与其他方案相比表现出更好的经济性。

1 混合型光储发电系统拓扑结构

光储联合发电系统主要由光伏电站、电网以及蓄电池和超级电容器组成的HESS构成, 整个系统的拓扑结构如图1所示。

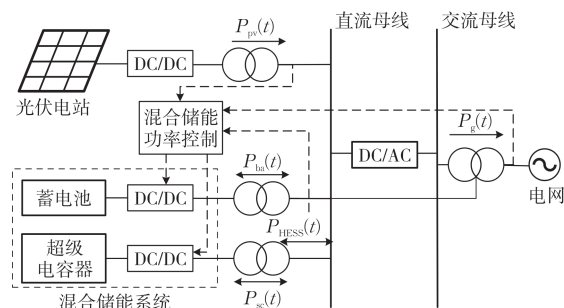


图1 光储系统结构

Fig.1 Structure diagram of photovoltaic-energy storage system

图1中, $P_g(t)$ 为光储系统的并网功率; $P_{pv}(t)$ 为光伏电站的输出功率; $P_{HESS}(t)$ 为HESS的充放电功率; $P_{ba}(t)$ 和 $P_{sc}(t)$ 分别为蓄电池和超级电容器的充放电功率。

根据图1中的功率关系, 可以得到:

$$\begin{cases} P_g(t) = P_{pv}(t) + P_{HESS}(t) \\ P_{HESS}(t) = P_{ba}(t) + P_{sc}(t) \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知, 混合储能参考功率为光储系统并网功率与原始光伏输出功率的差值。当 $P_{HESS}(t) > 0$ 时, HESS处于放电状态, 提供电能; 反之则为充电状态, 消耗电能。HESS利用蓄电池平抑低频波动分量, 利用超级电容器平抑高频波动分量。

2 综合目标域

光伏功率预测能够反映未来一段时间内光伏输出的变化趋势及功率水平, 但由于受到多种不确定因素影响, 预测结果往往存在一定偏差, 同时光伏出力还具有显著波动性。综合考虑预测误差与功率波动是实现高效混合储能配置的关键。以文献[17]的方法, 建立综合预测误差和波动率的综合目标域, 明确光伏功率的允许输出范围, 从而有效提升储能容量配置的合理性。

2.1 综合目标域的制定

根据Q/GDW 1617—2015《光伏电站接入电网技术规定》, 下文简称《技术规定》, 光伏电站的波动率限值如表1所示。

表 1 光伏电站最大波动率限值

Table 1 Maximum volatility limit of PV power plants

光伏电站装机容量/MW	1 min 最大波动率限值/MW	10 min 最大波动率限值/MW
<30	3	10
30~150	装机容量/10	装机容量/3
>150	15	50

为满足光储系统的并网要求, 本文 15 min 的光伏功率波动允许范围使用更加严格的 20%^[17,19-20], 确保不会超出国家标准, 得到光伏功率的波动允许带宽为:

$$D_{bd} = \begin{cases} 20\%S, P_p > 0 \\ -20\%S, P_p < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{bd} 为光伏功率波动带宽; S 为光伏电站装机容量; P_p 为光伏预测波动量。

此外, 《技术规定》要求光伏功率预测精度不低于 85%, 即预测误差不超过 15%, 得到光伏功率预测误差允许带宽为:

$$D_{yc} = \begin{cases} 15\%P, E_{pk} > 0 \\ -15\%P, E_{pk} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_{yc} 为光伏功率预测误差带宽; P 为光伏实际功率; E_{pk} 为光伏预测误差。

综合式(2)、(3), 得到综合目标域的范围:

$$D_{ref} = \begin{cases} \min(D_{yc}, D_{bd}), E_{pk} > 0, P_p > 0 \\ \max(D_{yc}, D_{bd}), E_{pk} < 0, P_p < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_{ref} 为综合目标域带宽。

通过以上分析, 得到综合目标域如图 2 所示。

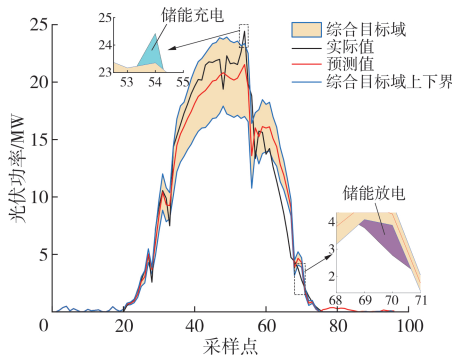


图 2 光伏综合目标域

Fig.2 Comprehensive PV target domain

2.2 混合储能充放电参考功率

根据光伏实际功率与综合目标域的关系, 分为综合目标域内部和外部两部分。

2.2.1 综合目标域内部的充放电参考功率

在目标域内部, 以预测功率作为并网功率, 与实际值之差作为 HESS 参考功率。若实际功率大于预测功率, 储能充电; 反之储能放电。目标域内部的充放电能量 $D_m(t)$ 为:

$$D_m(t) = \begin{cases} \int (P(t) - P_p(t)) dt, P_p(t) < P(t) < P_{up}(t), \text{储能充电} \\ 0, P(t) = P_p(t), \text{储能不动作} \\ \int (P_p(t) - P(t)) dt, P_{down}(t) < P(t) < P_p(t), \text{储能放电} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻的光伏功率; $P_p(t)$ 为 t 时刻的光伏功率预测值; $P_{up}(t)$ 和 $P_{down}(t)$ 分别为 t 时刻综合目标域的上、下界。

2.2.2 综合目标域外部的充放电参考功率

在目标域外部, 以综合目标域上下限作为并网功率, 与实际之差作为 HESS 参考功率。若实际功率高于目标域上限, 储能充电; 反之储能放电。目标域外部的充放电能量 $D_{out}(t)$ 为:

$$D_{out}(t) = \begin{cases} \int (P(t) - P_{up}(t)) dt, P(t) > P_{up}(t), \text{储能充电} \\ 0, P_{down}(t) < P(t) < P_{up}(t), \text{储能不动作} \\ \int (P_{down}(t) - P(t)) dt, P(t) < P_{down}(t), \text{储能放电} \end{cases} \quad (6)$$

3 ICPO-VMD-HT 算法原理

为提高功率分配的质量, 利用 ICPO-VMD-HT 对目标域内外功率进行分解解析, 具体流程如图 3 所示。

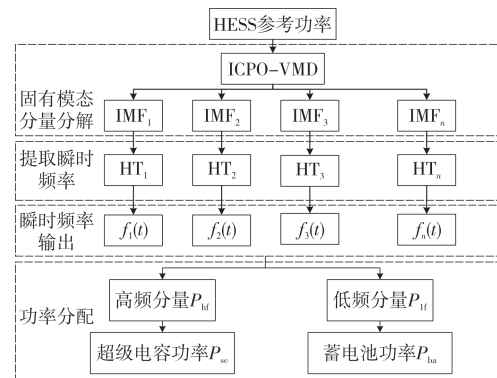


图 3 算法流程

Fig.3 Algorithm flowchart

3.1 VMD

VMD是一种基于傅里叶变换的自适应信号处理技术,有良好的抗噪声能力。与传统EMD(经验模态分解)相比,VMD能够在一定程度上抑制模态混叠现象和端点效应^[21]。使用VMD将光伏功率信号自适应地分解为若干具有不同中心频率和带宽的IMF(本征模态分量),使储能设备能够针对自身特性,分别承担高频/低频分量的平抑任务,实现更有针对性的功率分配。

VMD通过变分法最优化,使各个模态的频谱紧凑且中心频率分离,整体过程可由如下公式进行概括:

$$\min_{\{c_i\}, \{\omega_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^I \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * c_i(t) \cdot e^{-j\omega_i t} \right] \right\|_2^2 \right\} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I c_i(t) = f(t) \quad (8)$$

式中: $f(t)$ 为原始输入信号; $c_i(t)$ 为第 i 个模态分量; ω_k 第 i 个模态分量的中心频率; $*$ 为卷积计算; $\delta(t)$ 为单位冲激函数; i 为分解的模态数。

3.2 HT

HT无需对信号的平稳性作出假设,能够将实信号变换为解析信号,进而提取出信号的瞬时幅值和瞬时频率,适合对非平稳、时变信号进行时频分析。与VMD分解相结合后,能够精确刻画信号的时变特性和频率分布,为频率分量的区分提供有力依据。

对原始复杂信号VMD分解后得到的每个IMF信号 $c_i(t)$ 使用HT计算其瞬时频率 $f_i(t)$,表达式如下:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[\arctan \left(\frac{\tilde{c}_i(t)}{c_i(t)} \right) \right] \quad (9)$$

式中: $f_i(t)$ 为 t 的单值函数,即频率随时间变化; $\tilde{c}_i(t)$ 为 $c_i(t)$ 的HT。

依据瞬时频率 $f_i(t)$ 设定阈值,将信号分为高频分量和低频分量,分别交由超级电容器和蓄电池平抑,即:

$$\begin{cases} P_{sc} = P_{hf} = \sum_{i=1}^m c_i(t), f_i(t) > f \\ P_{ba} = P_{lf} = \sum_{i=m+1}^n c_i(t) + r(t), f_i(t) \leq f \end{cases} \quad (10)$$

式中: f 为区分高频分量和低频分量的分界频率,

定义为使模态混叠最少的频率。

3.3 ICPO-VMD参数

采用VMD分解功率数据,需要确定模态数量 K 和惩罚因子 α ,选择合适的值能够提高分解质量,本文采用ICPO算法对上述参数进行优化。

3.3.1 CPO(冠豪猪优化)算法原理

CPO是2024年由Mohamed Abdel-Basset等人提出的一种元启发式算法^[22],该算法模拟了CP(冠豪猪)的防御策略,利用4种防御机制处理求解过程中位置更新与速度调整,在搜索空间中搜索和逼近最优解。

CPO算法从初始个体集开始搜索过程:

$$\vec{X}_i = \vec{L} + \vec{r} \times (\vec{U} - \vec{L}), i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中: N 为搜索个体数量; x_i 为搜索空间的第 i 个候选解; L 和 U 分别为搜索范围的下限和上限; r 为0到1之间的随机数。

$$N = N_{\min} + (N - N_{\min}) \times \left(1 - \left(\frac{t \% T_{\max}}{T_{\max}} \right) \right) \quad (12)$$

式中: T 为循环次数; t 为当前函数评估值; T_{\max} 为函数评估的最大值; $\%$ 为求余运算; N_{\min} 为新的种群个体的最小数量。

1)第一阶段:随机搜索

$$\begin{cases} \vec{x}_i^{t+1} = \vec{x}_i^t + \tau_1 \times \left| 2 \times \tau_2 \times \vec{x}_{cp}^t - \vec{y}_i^t \right| \\ \vec{y}_i^t = \frac{\vec{x}_i^t + \vec{x}_r^t}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: \vec{x}_{cp}^t 为评估函数 t 的最优解; \vec{y}_i^t 为当前CP和从种群中随机选择的个体之间生成的向量; τ_1 为基于正态分布的随机数; τ_2 为 $[0, 1]$ 的随机值; r 为 $[1, N]$ 的随机值。

2)第二阶段:局部搜索

$$\vec{x}_i^{t+1} = (1 - \vec{U}_1) \times \vec{x}_i^t + \vec{U}_1 \times (\vec{y} + \tau_3 \times (\vec{x}_{r1}^t - \vec{x}_{r2}^t)) \quad (14)$$

式中: r_1 和 r_2 为 $[1, N]$ 的两个随机整数; τ_3 为0和1之间生成的随机值。

3)第三阶段:寻找新的解

定义控制搜索方向的参数 $\vec{\delta}$:

$$\vec{\delta} = \begin{cases} +1, \text{rand} \leq 0.5 \\ -1, \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

式中: rand 为 $[0, 1]$ 随机生成的变量。

$$\begin{cases} \vec{x}_i^{t+1} = (1 - \vec{U}_1) \times \vec{x}_i^t + \vec{U}_1 \times \\ (\vec{x}_{r_1}^t + S_i^t \times (\vec{x}_{r_2}^t - \vec{x}_{r_3}^t) - \tau_3 \times \vec{\delta} \times \gamma_t \times S_i^t) \\ \gamma_t = 2 \times \text{rand} \times (1 - \frac{t}{t_{\max}})^{\frac{t}{t_{\max}}} \\ S_i^t = \exp(\frac{f(\vec{x}_i^t)}{\sum_{k=1}^N f(\vec{x}_k^t) + \epsilon}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: r_3 为 $[1, N]$ 的随机值; x_i^t 为迭代第 i 个个体的位置; τ_3 为 $[0, 1]$ 的随机值; γ_t 和 S_i^t 分别为定义的防御因子和气味扩散因子。

4) 第四阶段: 通过扰动搜索空间找到更优解

$$\begin{cases} \vec{x}_i^{t+1} = \vec{x}_{\text{CP}}^t + [\alpha(1 - \tau_4) + \tau_4] \times (\vec{\delta} \times \vec{x}_{\text{CP}}^t - \vec{x}_i^t) \\ - \tau_5 \times \delta \times \gamma_t \times \vec{F}_i^t \\ \vec{F}_i^t = \vec{\tau}_6 \times \frac{f(\vec{x}_i^t) \times (\vec{x}_r^t - \vec{x}_i^t)}{\Delta t \cdot \exp(\sum_{k=1}^N f(\vec{x}_k^t) + \epsilon)} \end{cases} \quad (17)$$

式中: x_{CP}^t 为最优解; α 为收敛速度因子; τ_4 、 τ_5 、 τ_6 为 $[0, 1]$ 的随机值。

3.3.2 ICPO 算法

1) 在初始阶段, 使用 Logistic 混沌映射生成初始种群, 增强种群的初始分布均匀性和多样性。

$$x_{n+1} = r \cdot x_n (1 - x_n) \quad (18)$$

式中: r 为混沌控制参数, 取值范围为 $(0, 4)$ 。

2) 在第四阶段动态调整收敛速度 a , 采用自适应动态调整参数, 使初期增强全局搜索能力, 后期加强局部开发能力。

$$\alpha(t) = \alpha_0 \times (1 - \frac{t}{T_{\max}}) \quad (19)$$

4 混合储能容量配置算法

4.1 额定功率的确定

根据上文方法确定频率分界点后, 考虑储能系统的充放电效率, 额定功率的取值为:

$$P_n(t) = \begin{cases} P(t)\eta_c, P(t) < 0 \\ P(t)/\eta_d, P(t) \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_n(t)$ 为 t 时刻的实际充放电功率; $P(t)$ 为 t 时刻的参考充放电功率; η_c 和 η_d 分别为充电和放电效率。

4.2 额定容量的确定

$$E(t) = E(0) + \sum_{i=1}^k P_n(t) \Delta t \quad (21)$$

式中: $E(t)$ 为 t 时刻储能系统的电量; $E(0)$ 为储能系统初始电量; Δt 为储能系统采样点时间间隔。

$$\begin{cases} E_{\text{ba}} = \frac{\max(|E_{\text{ba}}(t)|) - \min(|E_{\text{ba}}(t)|)}{S_{\text{OC,ba,max}} - S_{\text{OC,ba,min}}} \\ E_{\text{sc}} = \frac{\max(|E_{\text{sc}}(t)|) - \min(|E_{\text{sc}}(t)|)}{S_{\text{OC,sc,max}} - S_{\text{OC,sc,min}}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: E_{ba} 和 E_{sc} 分别为蓄电池和超级电容器的额定容量; $S_{\text{OC,ba,max}}$ 、 $S_{\text{OC,ba,min}}$ 、 $S_{\text{OC,sc,max}}$ 、 $S_{\text{OC,sc,min}}$ 分别为蓄电池和超级电容器荷电状态的最大、最小值。

4.3 混合储能的经济性模型

目前储能设备的成本较高, 难以大规模建设使用^[23-24]。储能系统的成本包括初始投资 C_{iv} 、运维成本 C_{om} 、更新成本 C_{rep} 、回收处置 C_{dc} 和残值成本 C_{sv} 。建立 HESS 全寿命综合成本计算模型如式 (23) 所示:

$$C_{\text{HESS}} = C_{\text{iv}} + C_{\text{om}} + C_{\text{rep}} + C_{\text{dc}} - C_{\text{sv}} \quad (23)$$

式中: C_{HESS} 为混合储能的总成本。

1) 投资成本

$$C_{\text{iv}} = C_{\text{ba,iv}} + C_{\text{sc,iv}} \quad (24)$$

式中: $C_{\text{ba,iv}}$ 和 $C_{\text{sc,iv}}$ 分别为蓄电池和超级电容器的投资成本。具体计算式为:

$$\begin{cases} C_{\text{ba,iv}} = (C_{\text{ba,p}} P_{\text{ba}} + C_{\text{ba,e}} E_{\text{ba}}) \frac{\delta(1 + \delta)^{L_{\text{ba}}}}{(1 + \delta)^{L_{\text{ba}}} - 1} \\ C_{\text{sc,iv}} = (C_{\text{sc,p}} P_{\text{sc}} + C_{\text{sc,e}} E_{\text{sc}}) \frac{\delta(1 + \delta)^{L_{\text{sc}}}}{(1 + \delta)^{L_{\text{sc}}} - 1} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $C_{\text{ba,p}}$ 和 $C_{\text{sc,p}}$ 分别为蓄电池和超级电容器的单位功率成本; $C_{\text{ba,e}}$ 和 $C_{\text{sc,e}}$ 分别为蓄电池和超级电容器的单位容量成本; L_{ba} 和 L_{sc} 为使用寿命; δ 为折现率。

2) 运维成本

$$C_{\text{om}} = C_{\text{ba,om}} E_{\text{ba}} + C_{\text{sc,om}} E_{\text{sc}} \quad (26)$$

式中: $C_{\text{ba,om}}$ 和 $C_{\text{sc,om}}$ 分别为蓄电池和超级电容器单位容量的运维成本。

3) 更新成本

超级电容器的循环寿命较长, 通常无需更换, 故更新成本只需考虑蓄电池, 计算方法采用雨流计数法。

$$N_{\text{ba}} = -3278D^4 - 5D^3 + 12823D^2 - 14122D + 5112 \quad (27)$$

式中: D 为放电深度; N_{ba} 为循环使用次数。

蓄电池的使用寿命计算式为:

$$S_{ba} = \frac{\sum_{j=1}^m N_{ba}(D_j)}{365} \quad (28)$$

式中： S_{ba} 为蓄电池寿命； m 为蓄电池每日放电次数； $N_{ba}(D_j)$ 为蓄电池在放电深度 D_j 时的循环次数。

$$C_{rep} = \sum_{k=1}^n (C_{erep} E_{ba} + C_{prep} P_{ba}) (1+r)^{-\frac{kT}{n+1}} \quad (29)$$

式中： C_{erep} 和 C_{prep} 分别为蓄电池单位容量和单位功率的更换成本； T 为使用年限； r 为基准折现率； n 为使用年限内储能装置更新次数。

4)回收处置成本

$$C_{dc} = C_{ba_dc} E_{ba} + C_{sc_dc} E_{sc} \quad (30)$$

式中： C_{ba_dc} 和 C_{sc_dc} 分别为蓄电池和超级电容器单位容量的处置成本。

5)储能设备残值

$$C_{sv} = \sigma_{res} C_{iv} (1+r)^{-T} \quad (31)$$

式中： σ_{res} 为残值率。

4.4 混合储能的约束条件

1)储能充放电功率约束：

$$\begin{cases} -P_{ba_n} < P_{ba}(t) < P_{ba_n} \\ -P_{sc_n} < P_{sc}(t) < P_{sc_n} \end{cases} \quad (32)$$

式中： P_{sc_n} 和 P_{ba_n} 分别为超级电容器和蓄电池的额定功率。

2)储能SOC(荷电状态)约束：

$$\begin{cases} S_{OC,ba_min} \leq S_{OC,ba}(t) \leq S_{OC,ba_max} \\ S_{OC,sc_min} \leq S_{OC,sc}(t) \leq S_{OC,sc_max} \end{cases} \quad (33)$$

5 算例分析

本文以河北某光伏电站一典型日的实际数据作为算例进行分析，该光伏电站的装机容量为30 MW，采样时间间隔为15 min，共96个数据点。根据历史光伏数据，利用TCN-BiGRU算法进行功率预测，得到该日光伏电站的各项数据如图4所示。

由图4可以看出，得到的光伏并网功率相比光伏原始功率更平滑，根据综合目标域的定义，并网功率地波动率在15 min内不超过20%，且预测误差不超过15%，均满足我国并网要求。

分别计算综合目标域内外功率差作为HESS参考功率。其中，目标域内部为实际功率与预测功率之差，外部为实际功率与上下限之差，结果如图5所示。

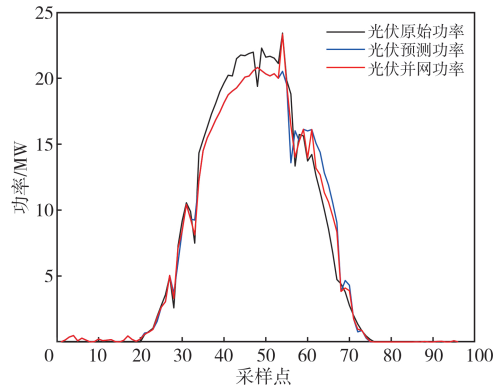


图4 光储系统功率对比

Fig.4 Power comparison of PV-energy storage system

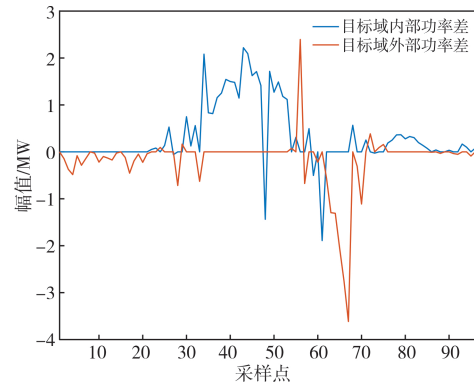


图5 目标域内外功率对比

Fig.5 Power comparison inside and outside target domain

5.1 优化算法对比分析

为验证本文所提ICPO的性能，分别用ICPO算法、CPO算法、PSO(粒子群优化)算法、NGO(北方苍鹰优化)算法、GWO(灰狼优化)算法对VMD的模式数量 K 和惩罚因子 α 参数进行优化，以包络熵作为适应度，记录每次迭代后的值，结果如图6所示。

由图6可以看出，ICPO的适应度始终低于CPO，在前8次迭代内与CPO差距很小，随着迭

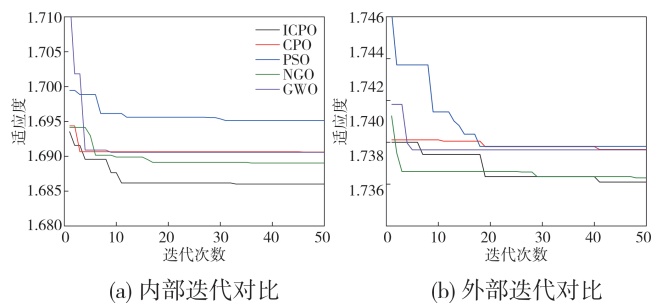


图6 5种优化算法适应度对比

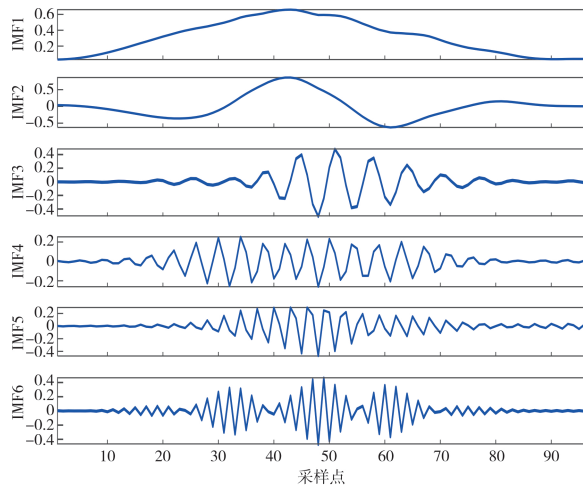
Fig.6 Fitness comparison of five optimization algorithms

代次数的增加, ICPO 明显优于 CPO, 50 次后的优化结果在 5 种算法中最优。这是因为在初期利用混沌映射生成的初始种群搜索更加全面, 随着迭代次数的增加, ICPO 可以动态调整收敛速度以加快搜索最优解。

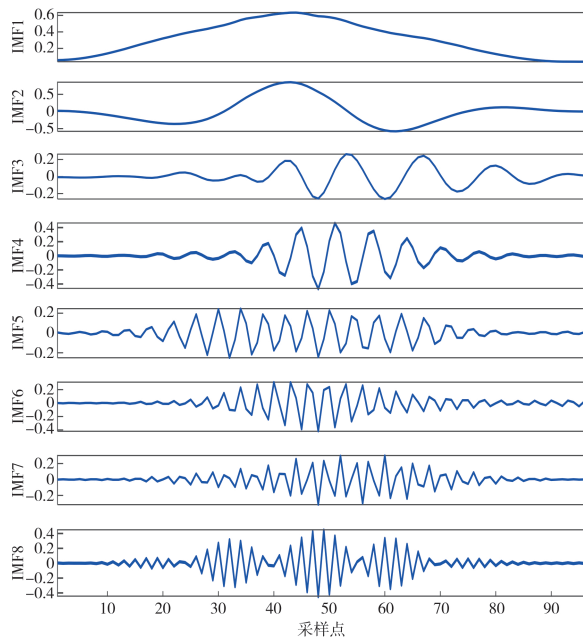
利用 ICPO 得到的内部最优 K 值为 6, α 值为 1 710; 外部最优 K 值为 8, α 值为 1 703。

5.2 目标域内外功率分解

根据上文结果对目标域内部和外部的功率差作 VMD 分解, 得到各模态分量, 结果如图 7 所示。



(a) 内部分解结果



(b) 外部分解结果

图 7 目标域内外功率 VMD 分解结果

Fig.7 VMD decomposition results for power inside and outside target domain

为验证 VMD 的优越性, 内部和外部功率的 EMD 和 VMD 结果通过 HT 得到的各个模态分量的幅频特性曲线如图 8 所示。

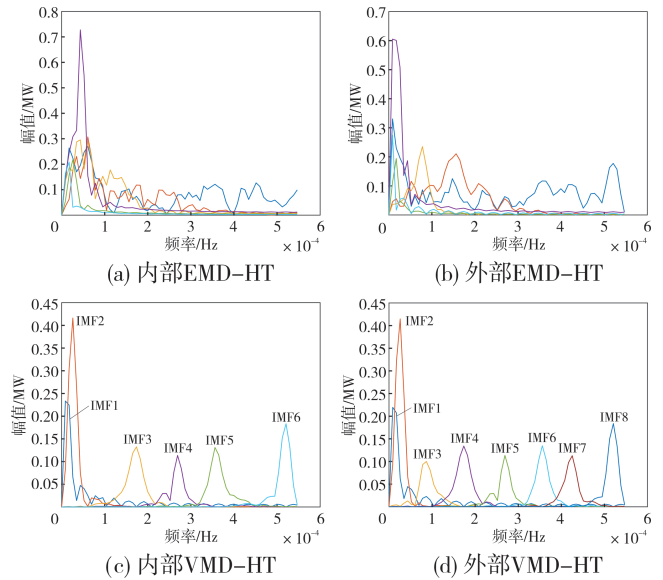


图 8 内外功率各分量的幅频特性曲线

Fig.8 Amplitude-frequency characteristic curves of power components inside and outside target domain

由图 8(a)和(b)可以看出, 使用 EMD 分解得到的各模态分量间存在严重的模态混叠现象, 无法找到合适的分频频率, 可能导致蓄电池承担一定的高频分量, 影响其使用寿命和储能经济性。

由图 8(c)和(d)可以看出, VMD 分解结果与 EMD 的结果相比, 模态混叠现象得到明显改善。内部频率 0.45 mHz 处混叠部分最少, 故以 0.45 mHz 为参考频率; IMF1—5 为低频分量, 作为蓄电池参考功率; IMF6 为高频分量, 为超级电容器参考功率。外部频率在 0.31 mHz 处混叠部分最少, 故以 0.31 mHz 为参考频率; IMF1—5 为低频分量, 作为蓄电池参考功率; IMF6—8 为高频分量, 作为超级电容器参考功率。

根据以上分析, 可以得到蓄电池和超级电容器的瞬时功率如图 9 所示。由图 9 可以看出, 蓄电池负责平抑波动幅值较大的低频功率波动, 避免频繁充放电对其寿命损耗的影响; 超级电容器负责平抑波动幅值较小的高频功率波动, 降低其容量配置。

5.3 容量配置经济性分析

为体现本文提出的储能配置方法在经济方面

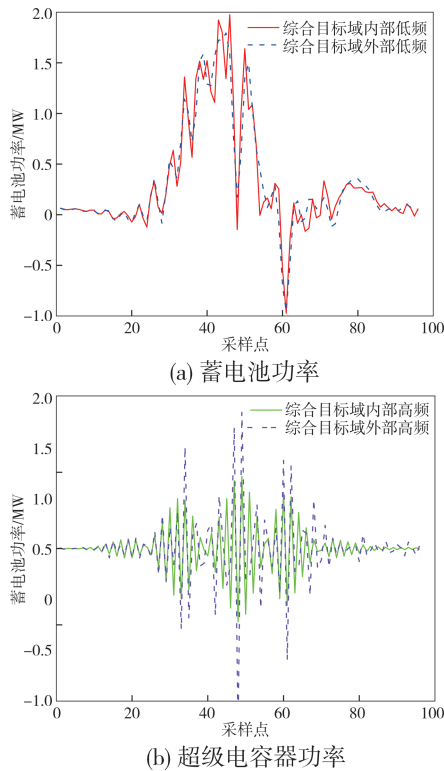


图 9 HESS 参考功率

Fig.9 Reference power of HESS

的优越性，选取 4 种配置方案进行比较，HESS 仿真的相关参数如表 2 所示。

表 2 HESS 相关参数

Table 2 Related parameters of HESS

对象	性能指标	参数
蓄电池	单位功率成本/(万元·MW ⁻¹)	270
	单位容量成本/(万元·MWh ⁻¹)	64
	运维成本/(万元·MWh ⁻¹)	0.01
	单位功率更新成本/(万元·MW ⁻¹)	200
	单位容量更新成本/(万元·MWh ⁻¹)	50
	处置成本/(万元·MWh ⁻¹)	2
	充放电效率/%	85
	SOC 阈值	[0.2, 0.8]
循环使用寿命/次	10 000	
超级电容器	单位功率成本/(万元·MW ⁻¹)	150
	单位容量成本/(万元·MWh ⁻¹)	2 700
	单位容量运维成本/(万元·MWh ⁻¹)	0.01
	处置成本/(万元·MWh ⁻¹)	0.5
	充放电效率/%	95
	SOC 阈值	[0.1, 0.9]
循环使用年限/年	20	
其他	残值率/%	10
	折现率/%	6

在 4 种配置方案中，方案 1—3 为对照组。其中，方案 1 为单一蓄电池储能，方案 2 为单一超级电容器储能，方案 3 为采用 EMD-HT 方法得到的 HESS 配置，方案 4 为采用本文 VMD-HT 分解方法得到的 HESS 配置。4 种方案的配置结果如表 3 所示。

表 3 储能容量配置结果

Table 3 Energy storage capacity allocation results

参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
蓄电池额定功率/MW	3.018	—	1.651	1.522
蓄电池额定容量/MWh	1.699	—	0.160	0.265
超级电容器额定功率/MW	—	3.805	1.037	0.556
超级电容器额定容量/MWh	—	0.399	0.081	0.016
年均综合成本/万元	1 007.867	1 210.543	869.805	545.810

从表 3 结果可以看出，两种混合储能的年均综合成本都低于单一储能，表现出良好的互补性和经济性。在 4 种方案中，本文提出的基于 VMD-HT 的方案，其蓄电池和超级电容器的额定功率均为最小，相较于单一蓄电池储能和单一超级电容器储能，年均综合成本分别降低 45.85% 和 54.90%。与基于 EMD-HT 的 HESS 配置方法相比，本文方法年均综合成本降低了 37.25%，这是因为 VMD 可以有效避免 EMD 的模式混叠，分解得到的信号质量更高，可以更加合理地设定分频频率，进而确定 HESS 容量，减少成本投入。

6 结论

为提高光储系统储能容量配置的经济性，本文提出一种考虑预测误差与平抑波动的混合储能优化配置方法。通过算例分析得出以下结论：

1) 设定综合目标域，基于光伏功率预测结果进行混合储能容量配置，既满足了对预测误差与功率波动性的控制要求，又能够依据预测值合理设定储能容量，实现储能系统的高效配置。

2) ICPO 算法相较于传统 CPO 算法，具备更强的全局搜索能力。随着迭代次数的增加，其优化效果更加明显，有效避免陷入局部最优，从而提升了 VMD 分解效果。

3) 配置 HESS 能够显著降低系统成本。与单一蓄电池储能和单一超级电容器储能相比，HESS 的年均综合成本分别降低了 45.85% 和 54.90%。

采用VMD-HT方法优化HESS容量后,其年均综合成本相较于EMD-HT方法进一步降低了37.25%。VMD分解可以有效抑制模态混叠,与HT结合后,可更准确地表征信号的时变特性与频率分布,实现频率有效分配,从而优化储能容量配置。

综上所述,本文提出的考虑预测功率与平抑波动的混合储能优化配置方法,为高渗透率光伏并网场景下的储能容量配置提供了一定的理论支撑。下一步工作将深入分析综合目标域内外混合储能的控制策略,并结合多场景、多工况开展研究,以提高储能容量配置方案的适用性。

参考文献

- [1] 许多,徐潇源,秦放,等.面向光储电站运行收益提升的光伏功率价值导向预测方法[J].电力系统自动化,2025,49(4):152-164.
XU Duo, XU Xiaoyuan, QIN Fang, et al. Value-oriented photovoltaic power forecasting method for operation revenue improvement of photovoltaic-energy storage plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 152-164.
- [2] 毛志宇,李晨,李培强,等.提升新能源消纳的多类型储能复合控制与经济性分析[J].电力自动化设备,2025,45(1):115-122.
MAO Zhiyu, LI Chen, LI Peiqiang, et al. Composite control and economic analysis of multi-type energy storage for improving accommodation of renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 115-122.
- [3] 刘嘉恒,张明,葛磊蛟,等.基于改进郊狼优化算法的光伏智能边缘终端优化配置方法[J].电工技术学报,2021,36(7):1368-1379.
LIU Jiaheng, ZHANG Ming, GE Leijiao, et al. Optimal configuration method of photovoltaic intelligent edge terminal based on improved coyote optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1368-1379.
- [4] XIAO G, XU F, TONG L H, et al. A hybrid energy storage system based on self-adaptive variational mode decomposition to smooth photovoltaic power fluctuation [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105509.
- [5] 吕金历,柯贤波,葛鹏江,等.新型电力系统下计入爬坡与互补特性的储能电站容量分配策略[J].电网与清洁能源,2025,41(5):75-85.
LÜ Jinli, KE Xianbo, GE Pengjiang, et al. Capacity allocation strategy for energy storage power stations considering ramp and complementary characteristics in the new power system [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(5): 75-85.
- [6] 李青春,徐君威,张绍强,等.计及新能源波动平抑的储能电站日前-实时运行决策[J].太阳能学报,2025,46(3):43-53.
LI Qingchun, XU Junwei, ZHANG Shaoqiang, et al. Decision for day-ahead and real-time operation of energy storage plants considering smoothing of new energy fluctuations [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2025, 46(3): 43-53.
- [7] 孙少华,李更丰,邹文秋,等.兼顾常规场景经济性与极端场景弹性的多类型储能设备配置策略[J/OL].高电压技术,2025:1-14.(2025-03-05).<https://link.cnki.net/doi/10.13336/j.1003-6520.hve.20250023>.
SUN Shaohua, LI Gengfeng, ZOU Wenqiu, et al. Configuration strategy of multi-type energy storage equipment considering economy of conventional scenarios and elasticity of extreme scenarios [J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-14. (2025-03-05). <https://link.cnki.net/doi/10.13336/j.1003-6520.hve.20250023>.
- [8] 王丽馨,魏明宇,刘禹彤,等.基于集对分析的电网调峰调频混合储能选型方法[J/OL].高电压技术,2025:1-16.(2025-06-11).<https://link.cnki.net/doi/10.13336/j.1003-6520.hve.20250094>.
WANG Lixin, WEI Mingyu, LIU Yutong, et al. Selection method of hybrid energy storage for peak shaving and frequency modulation of power grid based on set pair analysis [J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-16. (2025-06-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13336/j.1003-6520.hve.20250094>.
- [9] 张圣祺,刘何毓,汪飞,等.面向电网二次调频需求的“PXP”储能集群分布式均衡控制策略[J].中国电机工程学报,2022,42(3):886-900.
ZHANG Shengqi, LIU Heyu, WANG Fei, et al. A balancing control strategy for “power-X-power” energy storage cluster in system load frequency control [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 886-900.
- [10] LI H L, ZOU G B, ZHANG K K, et al. Selection of hybrid energy storage based on interval analytic hierarchy process [C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). April 14-16, 2023, Tianjin, China. IEEE, 2023: 754-758.
- [11] RANA M M, UDDIN M, SARKAR M R, et al. A review on hybrid photovoltaic-Battery energy storage system: Current status, challenges, and future directions [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104597.
- [12] 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.
- [13] 武鑫,李洋涛,马志勇,等.基于改进小波包分解的混合储能系统容量配置方法[J].*太阳能学报*,2023,44(8):23-29.
WU Xin, LI Yangtao, MA Zhiyong, et al. Capacity configuration method of hybrid energy storage system based on improved wavelet packet decomposition[J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2023, 44(8): 23-29.
- [14] 陈演斐,马程,葛磊蛟,等.分布式光伏接入下智能电网的集中式混合储能选址定容优化方法[J/OL].*电网技术*,2024:1-16.(2024-12-03).<https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409>.
CHEN Zhenfei, MA Cheng, GE Leijiao, et al. Optimization method for site selection and capacity determination of centralized hybrid energy storage in intelligent distribution networks under distributed photovoltaic access [J/OL]. *Power System Technology*, 2024: 1-16. (2024-12-03). <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409>.
- [15] 李鑫,王娟,邱亚,等.基于VMD的混合储能容量优化配置[J].*太阳能学报*,2022,43(2):88-96.
LI Xin, WANG Juan, QIU Ya, et al. Optimal allocation of hybrid energy storage capacity based on variational mode decomposition [J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2022, 43 (2): 88-96.
- [16] 钟士元,陈俊志,张华,等.跟踪光伏计划出力偏差的储能容量配置研究[J].*电网与清洁能源*,2024,40(6):30-38.
ZHONG Shiyuan, CHEN Junzhi, ZHANG Hua, et al. Re-search on energy storage capacity configuration for tracking output deviation of photovoltaic plan [J]. *Power Sys-tem and Clean Energy*, 2024, 40(6): 30-38.
- [17] 张琦,谢丽蓉,王威,等.计及补偿风电预测误差和平抑波动的混合储能分区优化控制策略[J].*太阳能学报*,2023,44(7):7-13.
ZHANG Qi, XIE Lirong, WANG Wei, et al. Optimal control strategy for hybrid energy storage zoning considering compensating wind power forecasting error and smoothing fluctuation [J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2023, 44(7): 7-13.
- [18] 谢丽蓉,郑浩,魏成伟,等.兼顾补偿预测误差和平抑波动的光伏混合储能协调控制策略[J].*电力系统自动化*,2021,45(3):130-138.
XIE Lirong, ZHENG Hao, WEI Chengwei, et al. Coordi-nated control strategy of photovoltaic hybrid energy stor-age considering prediction error compensation and fluctua-tion suppression [J]. *Automation of Electric Power Sys-tems*, 2021, 45(3): 130-138.
- [19] 石涛,张斌,晁勤,等.兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制[J].*电网技术*,2016,40(2):477-483.
SHI Tao, ZHANG Bin, CHAO Qin, et al. Economic stor-age ratio and optimal control of hybrid energy capacity combining stabilized wind power fluctuations with compen-sated predictive errors [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 477-483.
- [20] GUO S, ZHENG K, HE Y, et al. The artificial intelligence-assisted short-term optimal scheduling of a cascade hydro-photovoltaic complementary system with hybrid time steps[J].*Renewable Energy*,2023,202:1169-1189.
- [21] 王超,蔺红,庞晓虹.基于HPO-VMD和MISMA-DHKELM的短期光伏功率组合预测[J].*太阳能学报*,2023,44(12):65-73.
WANG Chao, LIN Hong, PANG Xiaohong. Short-term photovoltaic power combination prediction based on hpo-vmd and misma-dhkelm [J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2023, 44(12): 65-73.
- [22] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, ABOUHAWWASH M. Crested Porcupine Optimizer: a new nature-inspired me-taheuristic [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2024, 284: 111257.
- [23] 张帆.风储微网中混合储能系统容量优化配置及控制研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
ZHANG Fan. Research on capacity optimization configura-tion and control of hybrid Energy Storage System in Wind-Storage Microgrid [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong Univer-sity, 2022.
- [24] 王苏蓬.混合储能在平抑风电功率波动中的最优配置研究[D].淄博:山东理工大学,2022.
WANG Supeng. Research on optimal allocation of hybrid energy storage in suppressing Wind Power Fluctuation [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.

收稿日期: 2025-06-18; 修回日期: 2025-07-07

作者简介:

郭倍源(1989),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电力负荷预测及功率预测技术应用。

(本文编辑: 孙文文)