

# 基于二阶滤波的双参数储能系统控制器设计方法研究

朱正雨<sup>1</sup>,李学峰<sup>1</sup>,谭庄熙<sup>2</sup>,贺 悝<sup>2</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司 荆州供电公司,湖北 荆州 434020;2. 湖南科技大学,  
湖南 湘潭 411201)

**摘要:**平抑光伏波动场景下,为了减小储能系统(energy storage system, ESS)控制过程中存在的相位滞后,提出一种基于二阶滤波的ESS控制器。分析传统平滑控制采用低通滤波器存在的相位延迟特性对ESS容量的影响,相位延迟越大,ESS容量需求越大。为消除该影响,理论分析满足消除相位延迟的控制器最低阶数为二阶,并推导出基于二阶滤波的ESS控制器,提出控制参数设计方法,以有效减小平滑控制过程中的相位延迟,最小化ESS容量需求。该控制器设计简单,仅含有两个控制参数,能够推广于实际工程。最后,采用某5 MW光伏电站功率数据验证了所提出ESS控制器的有效性和优越性。

**关键词:**光伏功率波动;储能系统控制器;相位延迟;二阶滤波

## Research on controller design method of two-parameter energy storage system based on second-order filtering

ZHU Zhengyu<sup>1</sup>, LI Xuefeng<sup>1</sup>, TAN Zhuangxi<sup>2</sup>, HE Li<sup>2</sup>

(1. Jingzhou Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Jingzhou 434020, China;  
2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To reduce the phase lag existing in the control process of energy storage system (ESS) in the photovoltaic fluctuate suppression scenario, an innovative ESS controller based on second-order filtering is proposed. The effect of the phase delay characteristic of the traditional smoothing filter on the ESS capacity is analyzed. The larger the phase delay is, the greater the ESS capacity demand is. In order to eliminate this effect, the lowest order of the controller that can eliminate phase delay is the second order, and an ESS controller based on the second order filter is derived, and the control parameter design method is proposed to effectively reduce the phase delay in the smooth control process and minimize the ESS capacity requirements. The controller is simple in design and contains only two control parameters, which can be applied to practical projects. Finally, the power data of a 5MW photovoltaic power station are used to verify the effectiveness and superiority of the proposed ESS controller.

**Key words:** photovoltaic power fluctuation; energy storage system controller; phase delay; second-order filter

## 0 引言

近年来随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,以风电、光伏为代表的可再生能源发展迅速<sup>[1]</sup>,成为电网系统实现能源转型的主要力量<sup>[2]</sup>。光伏发电的能量来源于光照强度,具有间歇性、随波动性等特性,接入电网时将给电能质量和系统可靠性带来严峻挑战<sup>[3]</sup>。因此,亟需采取相关措施解决该问题。

为缓解光伏波动,有研究改变光伏板角度调整出力以减小其率波动,但该方法增加了控制复杂性,且光伏电站无法运行于最大功率跟踪模式<sup>[4]</sup>。采用ESS缓冲光伏功率波动<sup>[5]</sup>可辅助其最大限度捕

获光照能量,在ESS控制器中嵌入控制算法可控制并网功率满足要求。考虑到当前储能成本相对较高<sup>[6]</sup>,因此,提出合适的ESS控制器在满足光伏波动平抑需求的前提下最小化ESS容量。

目前ESS控制器的嵌入算法主要包括小波变换<sup>[7]</sup>、经验模态分解<sup>[8]</sup>等信号处理算法和一阶低通滤波<sup>[9-10]</sup>、滑动平均滤波<sup>[11-13]</sup>等数字滤波算法。其中,信号处理算法因计算量大难以应用于实时场景,通常被用于离线数据分析以确定储能系统容量<sup>[14]</sup>,而数字滤波具备实时性,在实时平抑场景应用广泛。文献[9]在ESS控制器中嵌入了一阶低通滤波算法,通过改变滤波时间常数以平抑波动和改善Soc水平,并在实际新能源场站验证其有效性;文献[10]将一阶低通滤波算法与灰色预测相结合,在ESS控制器中嵌入了组合算法以实现荷电状态自恢

收稿日期:2025-01-02;修回日期:2025-02-19

基金项目:湖南省自然科学基金(2022JJ40150);国家电网有限公司总部科技项目(52272810005)

复和功率平滑。文献[11—12]将滑动平均滤波算法嵌入了ESS控制器,并提出了计及Soc优化的滑动窗口自适应控制流程,通过调整功率防止Soc恶化。以上研究中ESS控制器能有效平抑波动,但控制过程中并网功率响应滞后,增加ESS容量配置。尽管文献[13]以当前时刻为端点的对称数据作为输入,从数据输入角度改善了滑动平均滤波滞后问题,但该算法涉及未来1 min级分辨率的功率预测数据,工程上难以实现。

针对以上问题,本文聚焦于ESS控制器特性,提出一种结构简单且易实现的二阶控制器,消除控制过程相位滞后以优化ESS运行。分析了传统控制器存在的相位滞后特性,推导出满足相位控制要求的二阶控制器,并提出参数设计方法,有效改善ESS控制器相位滞后,优化光伏功率平滑过程中的ESS功率,提高光储混合系统整体经济性。最后,采用某配电网实际光伏功率数据验证所提控制器的有效性。

## 1 光-储混合系统

### 1.1 光储控制结构

如图1所示,ESS集成到并网母线处形成光储混合系统,光伏功率 $P_{pv}$ 和ESS功率 $P_{ess}$ 通过并网母线输送至电网,并网功率为 $P_g$ 。ESS经双向DC-DC转换器连接,提供正负向功率控制,实现ESS充放电能力。以并网标准为依据,在储能变流器(power conversion system, PCS)中嵌入算法控制ESS出力可平滑光伏功率。

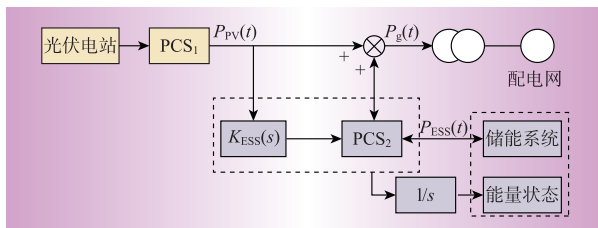


图1 光-储控制结构

Fig. 1 PV-ESS control structure

对光伏功率进行平滑处理得到参考并网功率,其与光伏功率差值为ESS参考功率。若忽略ESS功率损耗,则其功率可表示为

$$P_{ESS}(t) = P_g(t) - P_{PV}(t) \quad (1)$$

### 1.2 ESS容量配置

根据式(1)计算得到的ESS功率,以满足最大功率和容量需求配置ESS容量,运行时间间隔 $T_i$ 内,ESS额定功率为

$$P_{ESS,rate} = \max_{0 \leq t \leq T_i} |P_{ESS}(t)| \quad (2)$$

ESS功率对时间积分可得到其累积充放电能量曲线如式(3)所示,ESS容量配置由充放电能量曲线的边界值和 $S_{oc}$ 运行区间进行确定,如式(4)所示

$$E_{ESS}(t) = \int_0^t P_{ESS}(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$E_{ESS} = \max_{0 \leq t \leq T_i} |E_{ESS}(t)| \quad (4)$$

## 2 平滑光伏出力的ESS控制器

### 2.1 传统一阶低通控制相位延迟分析

传统功率平滑通常采用一阶低通滤波控制器实现ESS充放电控制<sup>[14]</sup>,其传递函数为

$$F(s) = \frac{1}{T_c s + 1} \quad (5)$$

式中: $T_c$ 为时间常数, $T_c$ 越大,功率波动程度越小。

由式(5)可知,调整 $T_c$ 可实现功率平滑控制,参考文献[14]方法获得其频域特性,可知控制延迟不可避免,且随着 $T_c$ 增大,相位延迟随之增加,导致ESS功率需求增加。因此,基于传统低通滤波的平滑控制不能获取最优并网功率。

### 2.2 相位滞后优化的ESS控制器

为了确定ESS控制器的阶数要求,对ESS能量需求进行定量分析,从图1可以看出,ESS能量状态是 $K_{ESS}(s)$ 的函数,为

$$E_{ESS}(s) = \frac{1}{s} K_{ESS} P_{PV}(s) \quad (6)$$

分析式(6)可知,ESS能量状态稳态误差由光伏功率中直流分量 $P_{PV,D}(s)$ 引起。将终值定理应用于式(6),得到 $E_{ESS}(s)$ 对光伏功率直流分量的终值为

$$\begin{aligned} E_{ESS,end}(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} E_{ESS}(t) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s E_{ESS}(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} K_{ESS} P_{PV,D}(s) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $P_{PV,D}(s)$ 为光伏功率直流分量。

分析可知,若 $E_{ESS}(t)$ 在 $t$ 趋于 $\infty$ 的值趋于0,则 $K_{ESS}(s)$ 在原点处至少需存在两个0点,也即 $K_{ESS}(s)$ 阶数不能低于二阶。

基于以上分析,本文采用二阶低通滤波控制器作为ESS控制器,其传递函数基本形式表示为

$$K_{ESS}(s) = \frac{gs^2}{s^2 + as + b} \quad (8)$$

式中: $a$ 和 $b$ 均为控制参数,且大于0; $g$ 为ESS补偿系数,取值范围为0到1。为了简化参数设计,将ESS控制器写成两个一阶滤波器的串联结构。

$$K_{ESS}(s) = g \left( \frac{sT_c}{sT_c + 1} \right)^2 \quad (9)$$

分析式(9)可知,设计ESS控制器时,只需确定

滤波时间常数  $T_c$  和  $Q$  即可。 $T_c$  决定平滑控制程度,  $g$  决定 ESS 补偿波动功率分量的程度, 可以并网波动要求进行参数确定, 以降低 ESS 容量需求。进一步地得到并网功率传递函数如式(10)所示。结合式(8)和式(10)可很具得到并网功率控制基本形式如式(11)所示

$$P_g(s) = [1 - K_{ESS}(s)]P_{PV}(s) \quad (10)$$

$$P_g(s) = \frac{(1-g)s^2}{s^2 + as + b}P_{PV}(s) + \frac{as + b}{s^2 + as + b}P_{PV}(s) \quad (11)$$

$$P_{ESS}(s) = P_{PV}(s) - P_g(s) \quad (12)$$

式中: 式(11)第1项为高通滤波器, 得到  $(1-g)$  倍的变化较快的高频分量; 第2项为低通滤波器, 得到变化较慢的低频分量, 式(11)分别记为  $P_{PV,h}(s)$  和  $P_{PV,l}(s)$ 。

分析式(11)可知, 低频分量  $P_{PV,l}(s)$  直接进行并网,  $(1-g)$  倍的高频分量  $P_{PV,h}(s)$  进行并网, 也即可以充分利用电力系统惯性消除部分高频波动分量, 具体参数设计可根据并网标准实现。对比一阶滤波器, 所提 ESS 二阶控制器功率由  $P_{PV,l}(s)$  降低至  $g$  倍  $P_{PV,l}(s)$ , 从而降低 ESS 容量需求, 提高经济性,

### 2.3 滤波控制参数确定方法

对比二阶滤波器标准形式即式(8)和本文采用的控制器即式(9), 得到控制参数与滤波时间常数之间的关系为

$$\begin{cases} c = 2/T_s \\ d = 1/T_s^2 \end{cases} \quad (13)$$

进一步地, 得到所提 ESS 控制器仅包含滤波时间常数  $T_s$  和 ESS 补偿系数  $K_b$  两个参数。 $T_s$  以平滑后功率满足并网标准进行确定。

## 3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中搭建图1光储系统, 采用如图2所示某5 MW 光伏电站典型日功率数据对所

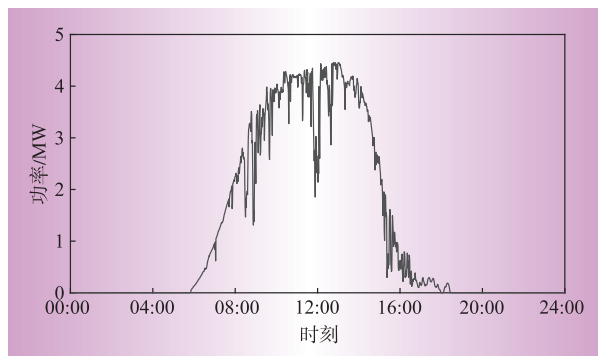


图2 典型日光伏功率

Fig.2 Photovoltaic power of a typical day

提 ESS 控制器进行验证。ESS 容量配置通常参考运行场景下最大功率、累计最大能量需求, 因此, 基于最大功率、累计最大容量需求指标进行分析。

以满足 1 min、10 min 双时间尺度并网标准为依据<sup>[15]</sup>, 在 ESS 补偿系数为 1 也即 ESS 完全补偿波动功率分量情况下确定滤波时间常数为 20 min。

### 3.1 不同控制下平滑效果及 ESS 容量需求分析

如图3所示为光伏功率、一阶低通滤波法和本文方法平滑后并网功率, 其局部放大图(08:00—09:00)清晰地展示了两种控制方法下平滑后并网功率与光伏功率的相位关系。分析可知, 一阶低通滤波平滑后并网功率的相位存在延迟, 整体滞后于光伏功率, 这将增加 ESS 功率。而采用本文方法时较好的改善该相位延迟问题, 平滑控制过程中并网功率相位延迟小, 能够较好跟踪光伏功率, 从而改善 ESS 功率, 降低其容量需求以提高整体经济性。

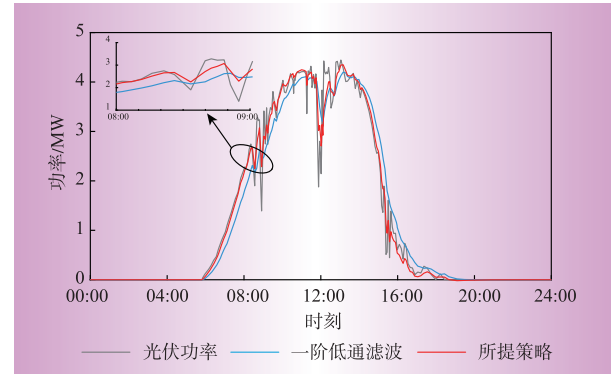


图3 光伏功率与并网功率

Fig.3 Photovoltaic power and grid-connected power

如图4所示为一阶低通滤波法和本文方法平滑过程中功率需求。由于一阶低通滤波平滑控制过程中存在相位延迟, 是的并网功率滞后于光伏功率, 导致 ESS 功率需求增加。而本文方法相位延迟小, 并网功率较好跟踪光伏功率, 使 ESS 功率整体低于一阶低通滤波控制。

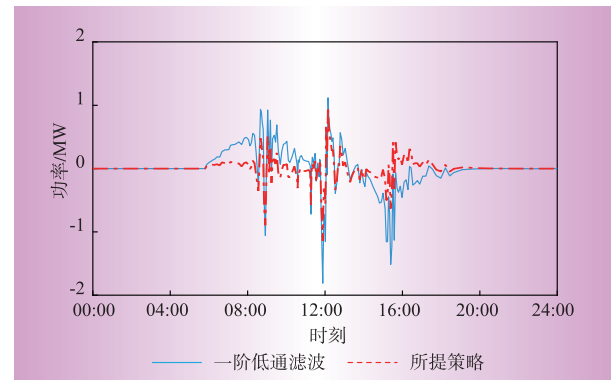


图4 储能系统功率

Fig.4 Energy storage system power

如图5所示为一阶低通滤波法和本文方法平滑过程中累计能量曲线,一般ESS容量配置以满足最大累积能量需求为依据。分析可知,一阶低通滤波的延迟效应使得平滑过程ESS功率中承担光伏功率中直流分量,从而导致能量累积,其累积能量曲线远大于本文方法,对ESS容量提出较高要求,将降低ESS平滑控制的经济性。

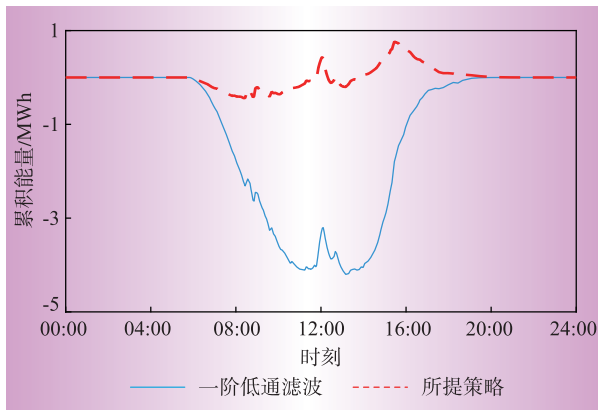


图5 储能系统累积能量曲线

Fig. 5 Cumulative energy curve of energy storage system

表1为不同滤波时间常数下一阶低通滤波法和本文方法平滑控制下ESS功率和容量需求,图6为

表1 不同控制策略下储能系统功率和容量变化趋势

Table 1 Power and capacity requirements of energy storage system under different control strategies

| 滤波时间常数/<br>min | 功率需求/MW |      | 累积最大能量/MWh |      |
|----------------|---------|------|------------|------|
|                | 一阶低通滤波  | 所提策略 | 一阶低通滤波     | 所提策略 |
| 20             | 1.77    | 1.14 | 4.2        | 0.77 |
| 22             | 1.94    | 1.21 | 5.01       | 0.85 |
| 24             | 2.07    | 1.26 | 6.2        | 0.95 |
| 26             | 2.15    | 1.32 | 6.5        | 1.04 |
| 28             | 2.23    | 1.38 | 7.21       | 1.16 |
| 30             | 2.40    | 1.45 | 7.76       | 1.21 |

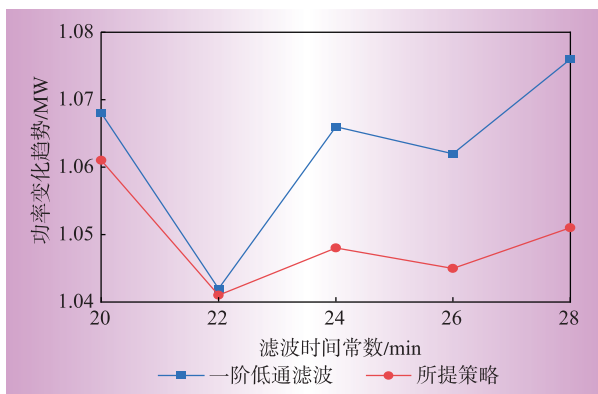


图6 不同滤波时间常数下储能系统功率需求变化趋势

Fig. 6 Variation trend of energy storage system power demand under different filtering time constants

滤波时间常数增加下ESS功率需求变化趋势。随着滤波时间常数增加,两种控制方法下功率和容量需求均有增加,滤波时间常数从20 min增加至30 min过程中,一阶低通滤波控制下功率/容量需求从1.77 MW/4.2 MWh增加至2.4 MW/7.76 MWh;本文方法从1.14 MW/0.77 MWh增加至1.45 MW/1.21 MWh。结合图6可知,由于本文方法控制下延迟现象对滤波时间常数的敏感度低于一阶低通滤波,因此,随着滤波时间常数的增加,其功率需求变化程度也整体低于一阶低通滤波,验证了本文方法的优越性。

### 3.2 不同控制参属下ESS容量趋势分析

以滤波时间常数满足并网标准也即 $T_s=20$  min,分析不同ESS补偿系数下对其功率和容量需求,结果如图7和表2所示。分析可知,随着ESS补偿系数的减小,对ESS功率和容量需求有减小的趋势,ESS补偿系数从1变化至0.1过程中,ESS容量配置需求由1.14 MW/0.77 MWh减小至0.38 MW/0.33 MWh。因此,实际应用过程中可结合此特性灵活配置ESS容量,提升光储系统整体经济性。

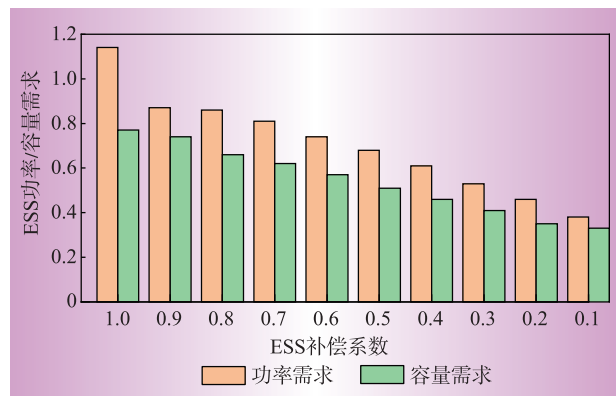


图7 不同ESS补偿系数下功率/容量需求

Fig. 7 Power/capacity requirements under different ESS compensation coefficients

表2 不同ESS补偿系数功率/容量参数

Table 2 Different ESS compensation coefficient power/capacity parameters

| ESS 补偿系数 | 功率需求/MW | 容量需求/MWh |
|----------|---------|----------|
| 1.0      | 1.14    | 0.77     |
| 0.9      | 0.87    | 0.74     |
| 0.8      | 0.86    | 0.66     |
| 0.7      | 0.81    | 0.62     |
| 0.6      | 0.74    | 0.57     |
| 0.5      | 0.68    | 0.51     |
| 0.4      | 0.61    | 0.46     |
| 0.3      | 0.53    | 0.41     |
| 0.2      | 0.46    | 0.35     |
| 0.1      | 0.38    | 0.33     |

## 4 结束语

为了提升ESS平抑光伏电站并网功率波动的经济性,本文提出一种基于二阶滤波的ESS控制器,通过算例分析得到以下结论:所提的ESS控制器能够克服光伏功率平滑控制过程中的相位延迟特性,以最小化储能系统容量需求,提高其运行经济性,该控制器的结构简单且控制参数少,易于实现,可为工程应用提供理论参考。D

## 参考文献:

- [1] 张韵,陈哲,安海云.光伏发电参与电力平衡的可信容量分析[J]. 电力需求侧管理,2024,26(2):82-86.  
ZHANG Yun, CHEN Zhe, AN Haiyun. Analysis on the credible capacity of photovoltaic power generation participating in power balance[J]. Electric Power Demand Side Management, 2024, 26(2):82-86.
- [2] 李笑蓉,陈熙,石少伟,等.高风电渗透率下储能配置与系统调节能力提升关联分析[J]. 电力需求侧管理,2023,25(2):8-14.  
LI Xiaorong, CHEN Xi, SHI Shaowei, et al. Association analysis of energy storage configuration and system regulating ability improvement under high wind power permeability[J]. Electric Power Demand Side Management, 2023, 25(2):8-14.
- [3] BARRA, PEDRO H, et al. A review on wind power smoothing using high-power energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137:110-155.
- [4] 李捷,杨霖.基于小波变换与机会约束规划的风电储能容量配置[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):37-42.  
LI Jie, YANG Lin. Wind power storage capacity configuration based on wavelet transform and chance constrained programming[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2):37-42.
- [5] 毛志宇,李培强,马德鑫,等.基于风功率波动平抑的复合储能两次功率分配容量配置方法研究[J]. 电网技术,2023,47(10):411-413.  
MAO Zhiyu, LI Peiqiang, MA Dexin, et al. Double power allocation of capacity configuration of compound energy storage based on wind power smoothing[J]. Power Grid Technology, 2019, 47(10):411-413.
- [6] ABDELGHANY, MUHAMMAD B, et al. Integration of cascaded coordinated rolling horizon control for output power smoothing in islanded wind-solar microgrid with multiple hydrogen storage tanks[J]. Energy, 2024, 291:130-142.
- [7] 毛志宇,李培强,郭思源.基于自适应时间尺度小波包和模糊控制的复合储能控制策略[J]. 电力系统自动化,2023,47(9):158-165.  
MAO Zhiyu, LI Peiqiang, GUO Siyuan. Control strategy of composite energy storage based on wavelet packet with adaptive time scale and fuzzy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9):158-165.
- [8] 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. Coordinated control strategy of photovoltaic hybrid energy storage considering prediction error compensation and fluctuation suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3):130-138.
- [9] 雷琰,欧阳曾恺,李征,等.平抑风能波动的储能电池SOC与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):126-131.  
LEI Ting, OUYANG Zengkai, LI Zheng, et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):126-131.
- [10] 王镇林,杨秀媛.基于灰色预测和低通滤波的风电平抑策略[J]. 现代电力,2023,40(3):295-302.  
WANG Zhenlin, YANG Xiuyuan. Wind power stabilization strategy based on grey prediction and low-pass filtering[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3):295-302.
- [11] 程显明,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/OL]. 电源学报,1-13[2024-03-21].  
CHENG Yuming, MENG Gaojun, JIA Peng et al. Optimal capacity configuration of hybrid energy storage system for mitigating fluctuations of wind power outputs[J/OL]. Journal of Power Sources, 1-13[2024-03-21].
- [12] 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 Grid Technology, 2022, 46(3):1016-1029.
- [13] 施啸寒,赵雅文,张恒旭,等.基于准零相位滤波器的电池储能系统平滑风电波动控制方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(4):45-53.  
SHI Xiaohan, ZHAO Yawen, ZHANG Hengxu, et al. Control method of wind power fluctuation smoothing for battery energy storage system based on quasi-zero phase filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4):45-53.
- [14] 桑丙玉,王德顺,杨波,等.平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3700-3706.  
SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3700-3706.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW 1617—2015光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2016.  
State Grid Corporation of China. Q/GDW 1617—2015 Technical rule for connecting photovoltaic power station to power grid[S]. Beijing:China Electric Power Press, 2016.

### 作者简介:

朱正雨(1980),女,湖北荆州人,硕士,研究方向为高比例新能源电力系统规划、投资决策等;

谭庄熙(1990),男,湖北荆州人,博士,副教授,研究方向为储能电力系统中的应用研究;

贺隍(1991),男,通信作者,湖北荆州人,博士,副教授,研究方向为智能电网、分布式储能、交直流混合电力系统。

(责任编辑 孙晶 汤丽莉)