



## 基于灰色预测和低通滤波的风电平抑策略

王镇林 杨秀媛

### Wind Power Stabilization Strategy Based on Grey Prediction and Low-pass Filtering

WANG Zhenlin, YANG Xiuyuan

引用本文:

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. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0349

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. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0349

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0349>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 考虑储能荷电状态平抑风电功率的抛物线规则变滤波时间常数方法

Parabola Regular Variable Filtering Time Constant Method Considering Energy Storage SOC State to Smooth Wind Power  
现代电力. 2020, 37(5): 518–525 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0133>

#### 平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略

Adaptive Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Mitigating Wind Power Fluctuations  
现代电力. 2020, 37(6): 646–653 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0949>

#### 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略

Hybrid Energy Storage Strategy Based on Parameter Optimized Variational Mode Decomposition  
现代电力. 2021, 38(1): 51–59 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0193>

#### 带混合储能的光伏并网系统功率协调控制策略研究

Research on Power Coordination Control Strategy of Photovoltaic Grid-connected System with Hybrid Energy Storage  
现代电力. 2019, 36(1): 37–44 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I1/37>

#### 基于自适应下垂控制的多储能直流微网能量管理策略

Energy Management Strategy for DC Microgrid of Multi-Energy Storage Based on Adaptive Droop Control  
现代电力. 2022, 39(2): 219–227 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0065>

#### 基于递归模糊神经网络的风电平滑控制策略

Wind Power Smoothing Control Strategy Based on Recursive Fuzzy Neural Network  
现代电力. 2022, 39(2): 228–235 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0089>

# 基于灰色预测和低通滤波的风电平抑策略

王镇林, 杨秀媛

(北京信息科技大学自动化学院, 北京市海淀区 100192)

## Wind Power Stabilization Strategy Based on Grey Prediction and Low-pass Filtering

WANG Zhenlin, YANG Xiuyuan

(College of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China)

**摘要:** 在风电并网处配置一定容量的储能系统对并网风功率进行平抑处理可以大幅提高风电并网的安全性、可靠性。传统的低通滤波等方法具有较高的滞后特性, 风电跟随能力较差, 这将导致储能系统的充放电深度变大, 从而影响储能系统的寿命, 同时也会使其配置容量需求增大。因此提出一种灰色预测和低通滤波相结合的储能系统平滑风电功率控制策略, 该策略能够根据储能系统的荷电状态 (state of charge, SOC) 变化自动调整算法参数, 保证 SOC 维持在安全范围内, 同时实现风电功率的平滑和跟踪, 并减少储能系统的容量配置需求及充放电深度。最后通过 Matlab 仿真验证了该策略的可行性和有效性。

**关键词:** 储能系统; 平滑风电功率; 荷电状态; 灰色预测; 低通滤波

**Abstract:** Equipping an energy storage system with a certain capacity at the site of grid-connection of wind power to stabilize the grid-connected wind power, the security and reliability of grid-connected wind power can be greatly improved. The long lag characteristic in low-pass filtering and other traditional means and the insufficient following ability of wind power system lead to larger charge and discharge depth of the energy storage system, so that the lifetime of the energy storage system is affected and the energy storage system with higher capacity has to be equipped. For this reason, by use of an energy storage system, in which the grey prediction and the low-pass filtering was combined, a wind power smoothing control strategy was proposed. The proposed strategy can automatically adjust the parameter of the algorithm according to the change of state of charge (abbr. SOC) of energy storage system to ensure the SOC was kept within the secure range, meanwhile, the smoothing and tracking of wind power was achieved, and the depth of charge and discharge and the demand on capacity configuration of energy storage system could be decreased. Finally, by means of simulation with MATLAB the feasibility

and effectiveness of the proposed strategy are verified.

**Keywords:** energy storage system; smooth wind power; state of charge; grey prediction; low pass filtering

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0349

## 0 引言

在全球响应低碳环保发展倡议的大背景下, 以风电、太阳能发电等为典型代表的新能源发电方式日益受到各个国家政府的高度重视<sup>[1-2]</sup>。作为一种可再生清洁能源的风能具有无污染、可再生、分布范围广等优点, 同时还具有能量密度较低、随机性大, 间歇性强等特点, 因此如何高质量地利用风能早已成为发电领域的重点研究方向<sup>[3-4]</sup>。储能系统由于具有快速响应能力、配置较为灵活等优点而得到广泛使用<sup>[5]</sup>。在风力发电系统中配置一定的储能系统, 可以有效地对风电波动进行平抑, 提高风电的质量, 降低风电对电网的冲击, 保证电网的稳定性<sup>[6-7]</sup>。

目前, 以低通滤波法、滑动平均法、小波包分解法等为主要原理的风电平抑方法应用最为常见, 文献<sup>[8]</sup>提出了一种基于分时段求解低通滤波系数的风电平抑策略, 给出了相应的容量配置方法, 虽然达到了风电并网要求指标, 但降低了储能系统的额定功率和额定容量; 文献<sup>[9]</sup>提出了一种采用氢气储能和超级电容相结合的混合储能平抑风电方法, 使用低通滤波进行风电初步平滑处理, 会造成风电平抑曲线滞后性较大, 导致储能系统配置容量需求增大; 文献<sup>[10]</sup>提出了一种低通滤波和小波包分解相结合的风电平抑策略, 可以有效实现风电平抑, 但算法在储能系统的荷

电状态 (state of charge, SOC) 处于危险状态时不能使 SOC 快速回到安全区; 文献 [11] 提出了一种基于小波分解和双层模糊控制的风电平抑策略, 但该方法计算量大, 且平抑效果有较高的延迟性; 文献 [12] 提出了一种根据储能系统 SOC 状态按照抛物线规则改变低通滤波时间常数的风电平抑方法, 在保证电池工作在正常 SOC 区间的同时, 达到了较好的风电平抑效果, 但同样未考虑该方法的延迟性对储能系统造成的影响; 文献 [13] 提出了一种时刻考虑储能出力水平的模型预测控制策略, 并对储能系统的 SOC 进行了约束, 可以获得较好的平抑效果, 但降低了储能系统的使用寿命; 文献 [14-16] 中提出了一种使用小波变换与傅里叶频谱分析相结合的平抑策略, 使超级电容器响应高频信号、镍氢电池响应低频信号, 但该方法成本较高, 计算量较大, 且对原始风电功率信号直接进行分解极易造成过度平抑或者平抑不足的情况; 文献 [17] 构建了基于多步模型算法控制的混合储能平抑-定容双层规划模型, 该算法中使用滑动平均法进行初步平滑处理, 对储能系统 SOC 进行了限制, 保证了储能系统的安全运行, 但同样存在平抑效果具有较高延迟性的问题; 文献 [18] 提出了一种滑动平均法和模型预测控制方法相结合的风电平抑策略, 平抑效果良好, 但风电平抑曲线同样具有很高的延迟性; 文献 [19] 提出先使用自适应滑动平均法进行初步平滑, 获得混合储能系统的预出力值, 再对获得的混合储能系统预出力值通过小波包分解, 根据混合储能特性进行二次功率分配, 在一定程度上减少了普通滑动平均法造成的延迟问题, 但并未考虑储能系统的 SOC, 可能会导致过充、过放问题。

综上, 目前的风电平抑策略大都采用了低通滤波法或者滑动平均法对原始风电功率进行初步平抑, 但这些策略均没有考虑到低通滤波法或者滑动平均法本身所具有的延迟特性, 这将使得风电平抑曲线严重滞后于风电原始功率曲线, 导致储能系统长时间处于单一的充电或放电状态。当出现风电爬坡现象时, 这种情况尤为严重, 从而增加储能系统的充放电深度, 进而增加储能系统的容量配置需求, 导致储能系统运行成本变大。

基于此, 本文提出了一种一阶灰色预测模型 GM(1,1) 与低通滤波相结合的平抑策略, 动态考虑储能系统的 SOC 状态, 使用抛物线规则改变融

合算法的参数, 引入变化率限制模块和 SOC 修正模块, 在保证储能系统工作在正常 SOC 区间的情况下实现风电平抑的同时, 使得平抑效果具有较低的延迟性。经仿真实验证明: 该平抑策略相比于其它平抑策略既可以实现风电平抑, 满足风电波动并网标准, 又可以减小平抑效果的延迟, 使风电平抑效果具有良好的跟随性, 同时可有效减少储能系统的出力和减小储能系统的充放电深度。

## 1 风储联合系统结构示意图

风储联合系统结构如图 1 所示。图中:  $P_w$  为风电场的出力功率;  $P_{bat}$  为储能系统输出功率;  $P_{ref}$  为风电并网功率参考值, 其中控制器的作用是实时采集风电功率输出值, 时刻保证储能系统的 SOC 不会超出安全范围。

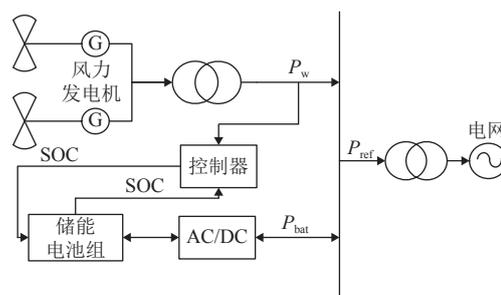


图 1 风储联合系统结构

Fig. 1 The architecture of combined wind power and energy storage system

## 2 风电波动平抑策略

风储联合系统的核心是平抑策略, 传统的一阶低通滤波方法可以得到较为平滑的平抑效果, 但此方法处理的风电功率具有较高的延迟性; 采用一阶灰色预测模型对风电进行跟随, 再经过风电变化率限制模块来满足国家风电波动标准, 实现风电的平抑, 虽然延迟性非常小, 但是此种方法得到的平抑曲线的平滑性较差; 因此本文提出一种将两者加权融合的算法, 在实现较好的平滑效果前提下, 减小风电平抑曲线的延迟性。

### 2.1 一阶灰色预测模型 GM(1,1) 实现风电功率跟随原理

灰色理论体系指出虽然事物的客观形象很复杂, 但总有它自身的整体功能, 认为任何事物必定具有一些内部规律, 其通过对原始数据序列的整理建立累加和累减数列, 进而建立相应的灰微

分方程，获得数据序列的发展趋势，从而对未来时刻的数据进行预测。本文通过建立一阶灰色预测模型 GM(1,1) 对风功率进行滚动超短期预测，实现对风功率的实时跟随，其计算方法如下。

设  $P^r = (p_{\Delta t}^r, p_{2\Delta t}^r, \dots, p_{n\Delta t}^r)$  为  $n$  个连续的真实原始风功率采样点数据，其中  $\Delta t$  为采样时间间隔，则其累加生成数列  $P^p$  为  $P^p = (P_{\Delta t}^p, P_{2\Delta t}^p, \dots, P_{n\Delta t}^p)$ ，其中

$$P_{k\Delta t}^p = \sum_{i=1}^k p_{i\Delta t}^r, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

定义  $P^p$  的灰导数为

$$d(k\Delta t) = P_{k\Delta t}^p - P_{(k-1)\Delta t}^p, k = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

令  $P^z$  为数列  $P^p$  的邻值生成数列，即

$$P_{k\Delta t}^z = \delta P_{k\Delta t}^p + (1 - \delta)P_{(k-1)\Delta t}^p, k = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中： $\delta$  为邻值生成数列的生成系数。

定义 GM(1,1) 的灰微分方程模型为

$$d(k\Delta t) + \alpha P_{k\Delta t}^z = \beta, k = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

式中： $\alpha$  为发展系数； $\beta$  为灰作用量。

若将  $k\Delta t = 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t$  视为连续变量  $s$ ，则可以演算得到 GM(1,1) 的白微分方程为

$$\frac{d(P_s^p)}{ds} + \alpha P_s^p = \beta \quad (5)$$

使用回归分析求取系数  $\alpha$  和  $\beta$  的估计值，并求解式 (5) 有

$$P_s^p = (P_{\Delta t}^r - \frac{\beta}{\alpha})e^{-\alpha(s-1)} + \frac{\beta}{\alpha} \quad (6)$$

于是得到累加数列预测值

$$P_{(k+1)\Delta t}^p = (P_{\Delta t}^r - \frac{\beta}{\alpha})e^{-\alpha k\Delta t} + \frac{\beta}{\alpha}, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (7)$$

得到预测值

$$P_{(k+1)\Delta t}^y = P_{(k+1)\Delta t}^p - P_{k\Delta t}^p, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

为了实现整体的功率跟踪，本文采用滑动窗口法<sup>[20]</sup>进行滚动预测，选取某时刻前  $l$  个采样时间间隔的原始数据作为灰色预测模型的原始数列对此时刻的风功率值进行预测，之后滑动窗口向右滑动一个采样时间间隔，预测下一个时刻的风功率值，之后重复该操作，直至将全部时刻的风功率值预测完毕，如图 2 所示。

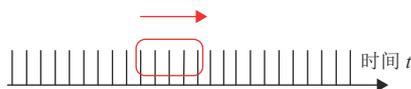


图 2 滑动窗口示意图

Fig. 2 The sketch map of sliding window

由于 GM(1,1) 要求原始数据满足灰色模型的级比检验，且预测结果的准确性会影响平抑效果，因此当滚动窗口内的真实风功率数值不满足级比检验，或者预测值的残差检验数值大于 0.1 时，采用一阶低通滤波法来处理当前风功率数值，以避免算法失效和预测误差太大导致平抑效果受到影响。

### 2.2 一阶低通滤波原理

采用一阶巴特沃兹低通滤波器对风电功率进行滤波，得到滤波器输出  $P_f$  与原始风功率  $P_w$  的关系如式 (9) 所示

$$P_f = \frac{1}{1 + Ts} P_w \quad (9)$$

式中： $T$  为一阶巴特沃兹低通滤波器的时间常数， $P_w$ 、 $P_b$ 、 $P_f$  之间的关系如式 (10) 所示

$$P_b = P_w - P_f = \frac{Ts}{1 + Ts} P_w \quad (10)$$

对式 (9)(10) 进行离散化处理如下

$$P_f(n) = \frac{T}{T + \Delta t} P_f(n-1) + \frac{\Delta t}{T + \Delta t} P_w(n) \quad (11)$$

$$P_b(n) = \frac{T}{T + \Delta t} (P_w(n) - P_w(n-1)) \quad (12)$$

式中： $n$  表示第  $n$  个采样点； $\Delta t$  为信号采样步长。

### 2.3 抛物线规则变参数加权融合控制方法

同时计算灰色预测值  $P^y$  和低通滤波值  $P_f$ ，结合 2 种算法的优点，将 2 种算法使用变参数加权相融合构成变参数加权融合算法以得到风电并网参考值  $P_{ref}$ ，其计算式如式 (13) 所示

$$P_{ref} = (1 - \lambda)P^y + \lambda P_f, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (13)$$

当参数  $\lambda$  变大时低通滤波权值变大，此时平抑效果好但会使储能系统出力增加，导致储能系统 SOC 值大幅变化，从而可能使储能系统出现过充或者过放问题，减少储能系统的工作寿命，且平抑曲线延迟性增加；当参数  $\lambda$  变小时灰色预测权值变大，此时平抑效果会受到很大影响，但储能系统出力减小，SOC 变化幅度较小，平抑曲线延迟性降低。

为减小储能系统 SOC 波动幅度，保证储能系统工作在最佳的 SOC 区域内，本文提出一种带有抛物线规则的变参数加权融合控制方法，对储能系统 SOC 进行区域划分，并分别针对充电和放电 2 种工况进行参数  $\lambda$  的变化规则设计。原理如图 3 所示。其中： $P_1$  为原始风功率与风电并网参考值  $P_{ref}$  经过变化率限制模块之后的目标值的差

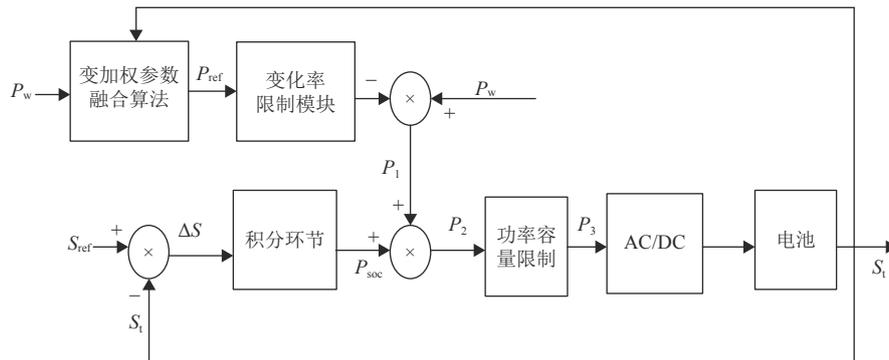


图3 带有抛物线规则的变参数加权融合控制方法

Fig. 3 A variable parameter weighted fusion control method with parabolic rule

值； $S_{ref}$ 为储能系统SOC目标值，一般为0.5； $S_t$ 为储能系统当前SOC值； $\Delta S$ 为SOC偏差值； $P_{soc}$ 为 $\Delta S$ 所对应的功率修正值； $P_2$ 为 $P_1$ 和 $P_{soc}$ 的代数和，经过功率和容量限制模块得到 $P_3$ 。

本文对储能系统SOC区间的划分如表1所示。

表1 电池SOC区间划分  
Table 1 Interval division of SOC of battery

电池状态	电池SOC区间
过充	(1-a,1]
电量较高	(1-b,1-a]
正常	[b,1-b]
电量较低	[a,b)
过放	[0,a)

为了更清楚地设计参数 $\lambda$ 的变化规则，将储能系统的SOC区间在充电工况下划分为过充、电量较高、正常、电量较低、过放5种状态，同理当储能系统处于放电工况下按同种规则进行SOC区间划分。抛物线规则变参数加权融合算法根据储能系统的实时SOC值，动态调整加权融合参数，保证储能系统SOC尽可能长时间维持在最佳的区间内，从而延长储能系统的使用时间，降低风储联合系统的使用和维护成本。

表2是根据电池电量区间划分的变参数 $\lambda$ 控制规则表，其中 $\lambda_c$ 和 $\lambda_d$ 分别为充电工况和放电工况下的融合算法参数。

参数 $\lambda$ 变化如图4所示，决定区间划分的参数 $a$ 和参数 $b$ 将会直接影响储能系统的充放电深度，可以根据不同储能系统的特性视情况进行选取，当储能系统SOC处于过放状态、电量较低区间、过充状态、电量较高区间时，随着SOC增大，

则曲线变化率变小，随着SOC减小则曲线变化率增大。采取这样的抛物线控制规则的原因是储能系统SOC趋近于危险状态时(SOC过大或者过小时)，融合算法参数 $\lambda$ 变化率快速变大，保证储能系统可以更加快速地调整其SOC至正常状态，从而增加储能系统SOC处于正常区间的時間，延长储能系统的寿命。

表2 融合算法参数 $\lambda$ 控制规则  
Table 2 The control rule of parameter  $\lambda$  in fusion algorithm

电池状态	电池SOC区间	融合算法参数 $\lambda$
过充	(1-a,1]	$\lambda_c = -(S_t - 0.5)^2 + m$
		$\lambda_d = (S_t - 0.5)^2 + n$
电量较高	(1-b,1-a]	$\lambda_c = -(S_t - 0.5)^2 + m$
		$\lambda_d = (S_t - 0.5)^2 + n$
正常	[b,1-b]	$\lambda_c = f$
		$\lambda_d = f$
电量较低	[a,b)	$\lambda_c = (S_t - 0.5)^2 + n$
		$\lambda_d = -(S_t - 0.5)^2 + m$
过放	[0,a)	$\lambda_c = (S_t - 0.5)^2 + n$
		$\lambda_d = -(S_t - 0.5)^2 + m$

本文考虑在变参数融合算法控制模块后加入功率变化率限制模块，以满足我国风电并网波动标准的要求，其设计流程如图5所示。图中： $T_s$ 为波动标准规定时间(1 min或10 min)； $T_c$ 为控制时间。

变参数融合控制算法可以快速响应当SOC接近为危险区间的状况，但无法改变储能系统的充放电状态。风电功率存在强随机性，仅靠其随机性来改变储能系统的充放电状态显然容易造成储能系统长时间连续处于充电或者放电状态，从而导致储能系统出现过充或者过放问题，因此本文引入SOC修正模块以避免出现此种情况。

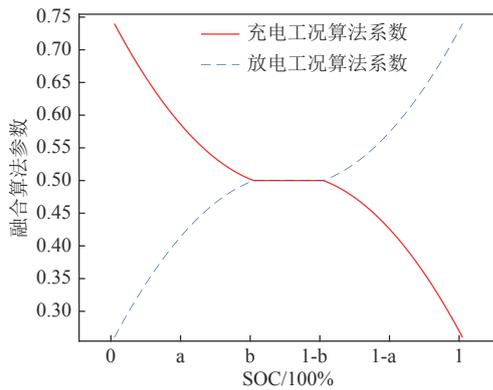


图 4 加权融合算法参数  $\lambda$  变化示意图

Fig. 4 Sketch map of the change of parameter  $\lambda$  in weighted fusion algorithm

SOC 修正模块如图 6 所示。图中： $\Delta S$  为当前 SOC 偏差值；PI 为比例积分控制器； $P_{soc}$  为修正模块得到的当前时刻功率修正值，其计算公式如式 (14) 所示。

$$P_{soc} = \Delta S (K_p + \frac{K_i}{S}) \quad (14)$$

### 3 算例分析与仿真验证

#### 3.1 平抑效果指标

为验证本文所提策略能够满足国家风电并网

波动标准，定义如下衡量指标。

1) 1 min 有功功率波动量最大值。

$$\Delta P_{1min\_max} = \max\{P(t+\Delta t) - P(t)\} \quad t = 1, 2, \dots, i-1 \quad (15)$$

式中： $\Delta P_{1min\_max}$  为 1 min 有功功率波动量最大值； $P(t+\Delta t)$  为  $t+\Delta t$  时刻功率值， $\Delta t$  为 1 min； $P(t)$  为  $t$  时刻功率值； $i$  为最大时刻。

2) 10 min 有功功率波动量最大值。

$$\Delta P_{10min\_max} = \max\{P(t+\Delta t) - P(t)\} \quad t = 1, 2, \dots, i-1 \quad (16)$$

式中： $\Delta P_{10min\_max}$  为 10 min 有功功率波动量最大值， $\Delta t$  为 10 min。

#### 3.2 仿真验证

使用 Matlab 进行仿真验证，算例采用某风电场真实风电数据，该风电场额定功率为 49.5 MW，经过对真实历史数据进行分析发现，该风电场一年时间内波动幅值在 10 MW 以下的情况占总体情况的 99.96%，因此本文选择储能系统的额定功率为 10 MW，额定容量为 15 MW·h，储能系统的初始 SOC 状态为 50%。

采用变参数融合算法进行风电平抑仿真。参数  $a$  和参数  $b$  分别取 0.2 和 0.4，变加权融合算法参数  $\lambda$  初始值设为 0.5， $K_p$  和  $K_i$  的取值分别为 1 和 0.05， $l$  为 9。

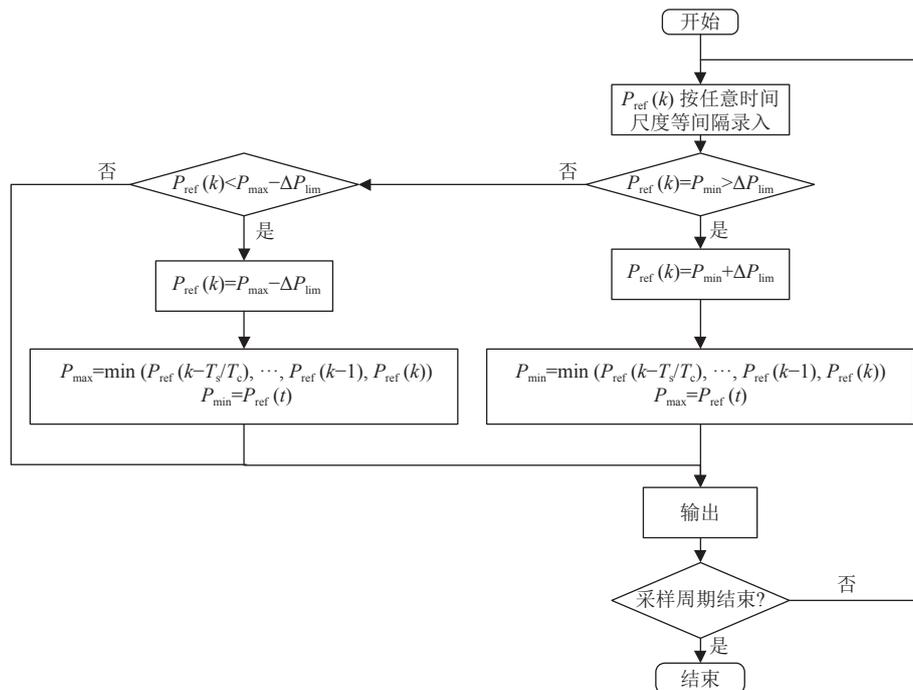


图 5 变化率限制模块流程图

Fig. 5 Flow chart of change rate limiting module

本文灰色预测模型实现功率跟随的效果如图7所示，该图选取数据为一年内某天的真实风电功率数据。可以验证使用灰色预测实现功率跟随的有效性。图8和图9为风电功率平抑前后1 min和10 min的风电波动量仿真图，该仿真结果可以验证本文策略的平抑效果能够满足国家风电并网波动标准。

为验证本文所提策略在储能系统长时间处在最佳SOC区间和减少储能系统的出力等方面具有的优越性，将文献[12]所提的考虑储能SOC状态的风电参与需求响应的抛物线规则滤波时间常数方法与本文方法进行对比。

图10和图11为2个随机选取的典型场景对

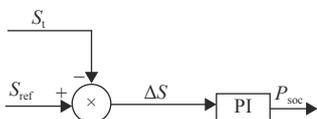


图6 SOC修正模块框图

Fig. 6 Block diagram of SOC power correction module

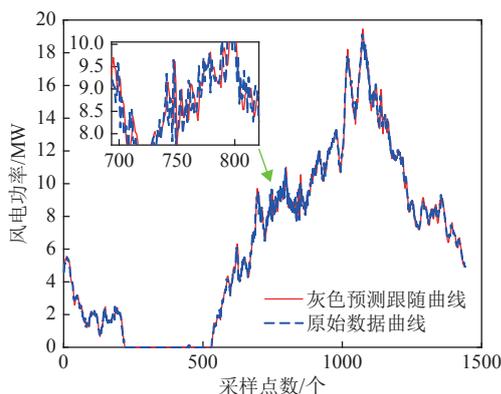


图7 灰色预测模型功率跟随效果

Fig. 7 Power following effect of grey prediction model

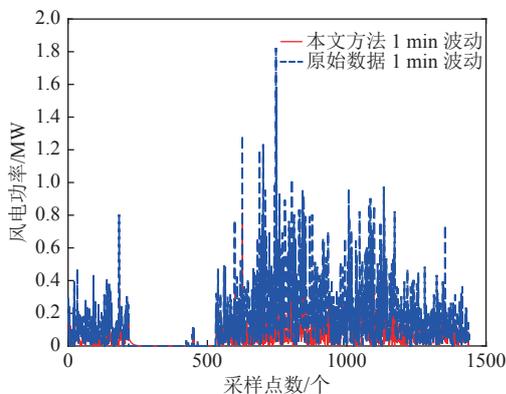


图8 平抑前后1 min波动量

Fig. 8 Fluctuation quantity within one minute before and after stabilization

比仿真结果，仿真结果验证了本文策略比以低滤波等为基本原理的平抑方法具有更低的延时性。

图12为随机3天储能系统出力曲线，由图12可以验证本文策略可以有效地减少储能出力，尤其是在储能出力功率存在峰值时效果更为明显，可以有效减少储能系统不必要的充放电。

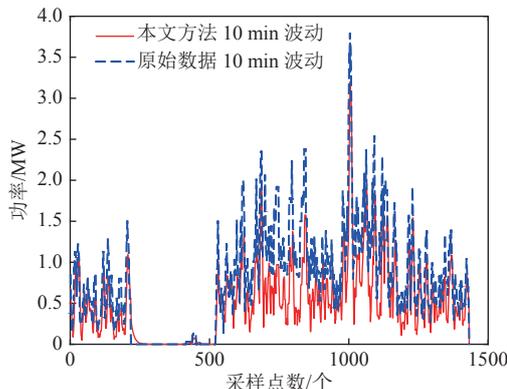


图9 平抑前后10 min波动量

Fig. 9 Fluctuation quantity within 10 minute before and after stabilization

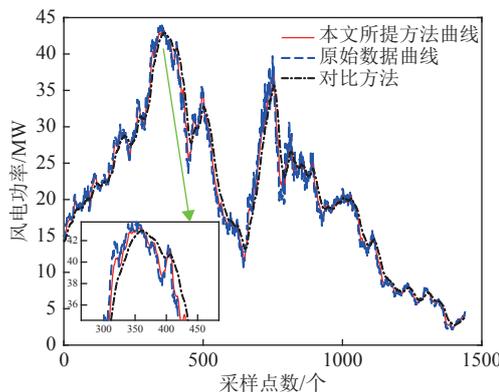


图10 典型场景1平抑效果对比

Fig. 10 Contrast of stabilization effect under typical scene 1

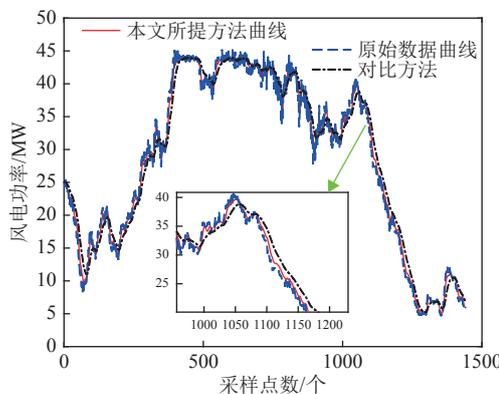


图11 典型场景2平抑效果对比

Fig. 11 Contrast of stabilization effect under typical scene 2

图 13 为储能系统随机 3 天的 SOC 曲线对比图, 从对比结果可知, 本文策略 SOC 曲线波动更小更平稳, 储能系统 SOC 充放电深度更小, 储能系统出力更少, 且可以长时间稳定在适宜的 SOC 区间内, 能够有效地延长储能系统的寿命, 同时也可以相应地减少储能系统的容量配置成本。

图 14 为本文策略 SOC 修正模块的仿真效果对比图, 可以验证本文设计的 SOC 修正模块能够有效避免储能系统 SOC 超出最佳的 SOC 工作区间, 延长储能系统工作寿命。

## 4 结论

本文设计了一种一阶灰色预测模型同一阶低通滤波相结合的变融合参数风电平抑策略。同时设计了变化率限制模块、SOC 状态修正模块, 并综合考虑了储能系统的 SOC 状态和平抑策略的延

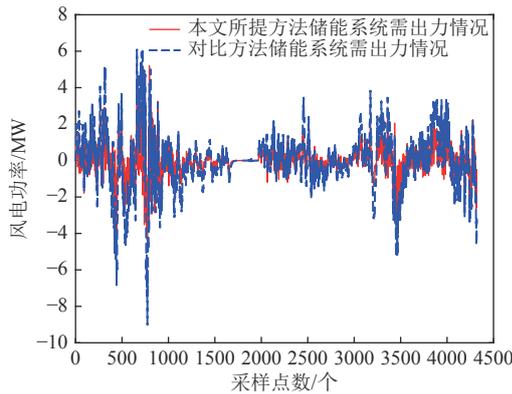


图 12 随机 3 天储能系统出力情况对比

Fig. 12 Contrast of output of energy storage system within random 3 days

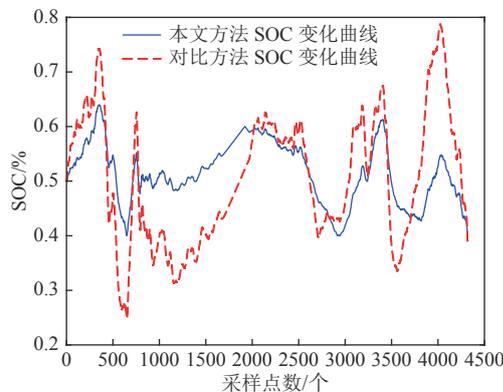


图 13 随机 3 天储能系统 SOC 变化曲线对比

Fig. 13 Contrast of SOC changing curve of energy storage system within random 3 days

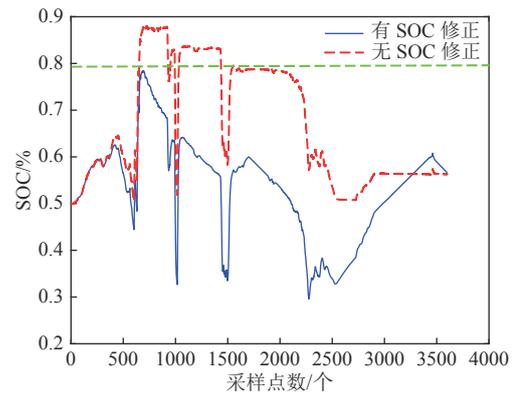


图 14 SOC 修正模块作用图

Fig. 14 Function diagram of SOC correction module

时性。通过在 MATLAB 软件中进行仿真分析, 进一步证明了本文方法可以在满足国家电网的标准下, 有效降低以低通滤波为基本原理的平抑策略在平抑效果上的高延迟性, 减小储能系统的充放电深度, 从而减少储能系统的容量配置需求, 同时保证储能系统 SOC 长时间处于合理的范围内, 避免储能系统出现过充与过放的危险情况, 延长储能系统的使用寿命。

## 参考文献

- [1] 屈博, 刘畅, 李德智, 等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 1-3,9. QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, *et al.* Research on power alternative development strategy under the goal of "carbon neutralization"[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(2): 1-3,9(in Chinese).
- [2] 郭伟, 唐人虎. 2060碳中和目标下的电力行业[J]. 能源, 2020(11): 19-26. GUO Wei, TANG Renhu. Power industry under 2060 carbon neutralization target[J]. *Energy*, 2020(11): 19-26(in Chinese).
- [3] 赵静波, 黄强, 赵香, 等. 基于模糊化动态评估的新能源消纳制约因素分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(04): 1286-1295. ZHAO Jingbo, HUANG Qiang, ZHAO Xiang, *et al.* Analysis of new energy consumption constraints based on fuzzy dynamic evaluation [J]. *High Voltage Technology*, 2022, 48(04): 1286-1295(in Chinese).
- [4] 张焜. 储能应用于风电功率平抑的优化配置与控制策略[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [5] XIAN Liang, TENG Zonghe, GAO Yingyuan, *et al.* Key technologies and the implementation of wind, PV and storage co-generation monitoring system[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, 2(2): 104-113.

- [6] 徐雁飞. 混合储能系统平抑风电场有功功率波动的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [7] JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong, WANG Haijiao. A battery energy storage system dual-layer control strategy for mitigating wind farm fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3263–3273.
- [8] 林建新, 温步瀛, 陈冲. 基于分段平滑风电输出功率波动的储能系统容量配置方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 37(2): 110–114.  
LIN Jianxin, WEN Buying, CHEN Chong. Capacity allocation method of energy storage system based on piecewise smooth wind power output fluctuation[J]. *Power Capacitor and Reactive Power Compensation*, 2016, 37(2): 110–114(in Chinese).
- [9] 聂聪颖, 沈小军, 吕洪, 等. 并网型风电场氢超混合储能容量配置及控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 1–8.  
NIE Congying, SHEN Xiaojun, LÜ Hong, *et al.* Research on hydrogen super hybrid energy storage capacity configuration and control strategy of grid connected wind farms[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 1–8(in Chinese).
- [10] 李征, 陈佳瑜, 石坤. 风电功率波动频率域分析及储能平滑功率算法优化[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(4): 184–193.  
LI Zheng, CHEN Jiayu, SHI Kun. Frequency domain analysis of wind power fluctuation and optimization of energy storage smoothing power algorithm[J]. *Journal of Solar Energy*, 2020, 41(4): 184–193(in Chinese).
- [11] 侯倩. 平抑风电出力的风储系统控制策略[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(12): 242–247.  
HOU Qian. Control strategy of wind storage system for stabilizing wind power output[J]. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2020, 51(12): 242–247(in Chinese).
- [12] 冯春生, 杨秀媛, 陈小波. 考虑储能荷电状态平抑风电功率的抛物线规则变滤波时间常数方法[J]. *现代电力*, 2020, 37(5): 518–525.  
FENG Chunsheng, YANG Xiuyuan, CHEN Xiaobo. Parabolic regular variable filter time constant method for stabilizing wind power considering energy storage state of charge[J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(5): 518–525(in Chinese).
- [13] 刘颖明, 王晓东, 彭朝阳. 计及储能出力水平的平滑风电功率模型预测控制策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1723–1731.  
LIU Yingming, WANG Xiaodong, PENG Chaoyang. Smooth wind power model predictive control strategy considering energy storage output level[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1723–1731(in Chinese).
- [14] 焦东东, 陈洁, 付菊霞, 等. 平抑风电功率波动的储能容量配置[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(3): 66–73.  
JIAO Dongdong, CHEN Jie, FU Juxia, *et al.* Energy storage capacity allocation for stabilizing wind power fluctuation[J]. *Power Grid and Clean Energy*, 2020, 36(3): 66–73(in Chinese).
- [15] 程龙, 张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(3): 100–104, 128.  
CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for stabilizing power fluctuation in hybrid energy storage system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3): 100–104, 128(in Chinese).
- [16] 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 mitigation strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 1016–1029(in Chinese).
- [17] 付菊霞, 陈洁, 邓浩, 等. 平抑风电波动的混合储能系统控制策略[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(5): 94–100.  
FU Juxia, CHEN Jie, DENG Hao, *et al.* Control strategy of hybrid energy storage system to stabilize wind power fluctuation[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2020, 57(5): 94–100(in Chinese).
- [18] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 基于滑动平均和模型预测控制的风储平抑策略[J]. *控制工程*, 2019, 26(1): 114–119.  
ZHANG Zhuyao, GUO Xiaoli, ZHANG Xinsong, *et al.* Wind storage stabilization strategy based on moving average and model predictive control[J]. *Control Engineering*, 2019, 26(1): 114–119(in Chinese).
- [19] 陈裕, 张怡, 谢俊峰. 自适应滑动平均与小波包分解平抑风电波动[J]. *控制工程*, 2021, 28(7): 1281–1288.  
CHEN Yu, ZHANG Yi, XIE Junfeng. Adaptive moving average and wavelet packet decomposition to stabilize wind power fluctuation[J]. *Control Engineering*, 2021, 28(7): 1281–1288(in Chinese).
- [20] 吴倩, 王洋, 王琳媛, 等. 计及波动平抑与经济性的风光储能系统中混合储能容量优化配置[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(4): 112–119.  
WU Qian, WANG Yang, WANG Linyuan, *et al.* Optimal allocation of hybrid energy storage capacity in wind solar energy storage system considering fluctuation stabilization and economy [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2022, 59(4): 112–119(in Chinese).

收稿日期: 2021–12–07

作者简介:

王镇林(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程及新能源储能技术, E-mail: wangzhenlinshuai@163.com;

杨秀媛(1962), 女, 教授, 通信作者, 研究方向为新能源的电力系统分析与规划, E-mail: yangxy0912@163.com.