

## 考虑风电波动率的储能系统优化配置策略

陈泽西<sup>1,2</sup>, 孙玉树<sup>3</sup>, 张妍<sup>4†</sup>, 李美成<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 新能源学院, 北京 102206; 2. 国网北京城区供电公司, 北京 100034;  
3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 4. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

**摘要:**为了减缓风电出力波动性对电网的影响,提出应用模型预测控制算法来分析不同波动率风电的储能系统的优化配置.首先,基于模型预测控制方法,研究储能平抑风电波动的控制策略,并建立优化配置模型;其次,提出风电的正负波动率和累计波动率的概念,并梯次分析了3种典型波动率下的储能系统功率和容量的配置策略;最后,基于MATLAB软件,从构建的标准正弦风电到随机选取的风电等3种典型场景进行算例分析,验证本文所提出的基于模型预测控制的风电波动平抑策略和采用累计波动率差值作为储能容量的评价指标有效性,为可再生能源的友好并网及储能优化配置提供一种参考.

**关键词:**风电波动;模型预测控制;储能;正负波动率;累计波动率差值

**中图分类号:**TM614

**文献标志码:**A

## Optimal Configuration Strategy of Energy Storage System Considering Wind Power Fluctuation Rate

CHEN Zexi<sup>1,2</sup>, SUN Yushu<sup>3</sup>, ZHANG Yan<sup>4†</sup>, LI Meicheng<sup>1</sup>

(1. School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. State Grid Beijing Urban Power Supply Company, Beijing 100034, China;  
3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
4. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In order to mitigate the impact of wind power fluctuation on the power grid, a model predictive control algorithm is proposed to analyze the optimal allocation of energy storage system with different fluctuation rate of wind power. Firstly, based on the model predictive control (MPC) algorithm, the control strategy of using energy storage to smooth the wind power fluctuation is studied, and an optimal configuration model is established. Secondly, the concepts of positive and negative fluctuation rate and cumulative fluctuation rate of wind power are proposed, and the power and capacity allocation strategies of energy storage system under three typical fluctuation rates are analyzed in steps. Finally, three typical scenarios, from the established standard sinusoidal wind power to the randomly selected wind power, are analyzed based on MATLAB software to verify the effectiveness of wind power fluctuation mitigation strategy based on model predictive control algorithm and the cumulative fluctuation rate difference as energy storage size evaluation index, which provides a reference for the friendly grid connection of renewable energy and energy stor-

\* 收稿日期:2019-10-22

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(71974055), National Natural Science Foundation of China(71974055);北京节能与电力技术开发基金会资助项目(2019BJ0294), Beijing Energy Conservation and Power Technology Development Foundation Project(2019BJ0294);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020FR002), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2020FR002)

**作者简介:**陈泽西(1990—),男,湖南常德人,华北电力大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: zhangyan8698@ncepu.edu.cn

age optimal configuration.

**Key words:** wind power fluctuation; model predictive control (MPC); energy storage; positive and negative fluctuation rate; cumulative fluctuation rate difference

为了应对传统能源的短缺和环境污染等问题,可再生能源得到快速发展,并越来越受到人们的青睐.风力发电是可再生能源发电的重要组成部分,受天气条件的影响,风电具有波动性和间歇性等特点,其规模化并网会对电力系统的频率、电压和电能质量等安全可靠运行带来极大影响<sup>[1-3]</sup>.储能系统能够灵活调节电力系统的功率输出,可应用于平抑风电的功率波动,提高风电并网的友好程度,促进电网对风电的规模消纳<sup>[4-5]</sup>.

目前,国内外已经开展了关于平抑风电波动储能系统的优化配置的前期研究工作.一方面,设计了一种电池储能的缓冲策略以减少不稳定风电功率对电网的影响,并通过求解经济优化运行目标函数确定储能容量<sup>[6]</sup>;也提出了基于磷酸铁锂电池的一种储能高效充放电控制方法,在配置最小容量的情况下实现对风电功率的滤波<sup>[7]</sup>.另一方面,在平滑风电功率波动时,应用频谱分析方法优化储能容量,使配置的储能容量最小<sup>[8]</sup>.也可以应用多类型储能平抑风电功率波动,构建经济成本最小的储能配置与运行模型,应用智能算法进行模型求解<sup>[9]</sup>.更有采用多类型储能吸收风电功率中不同频段的波动部分,将神经网络算法应用到储能配置的优化当中,建立经济性和功率平滑指标的耦合关系以实现多类型储能的高效运行<sup>[10]</sup>.同时,为了提高并网风电的容量可信度,提出了基于改进的小波函数的混合储能优化配置策略,通过算例验证其有效性<sup>[11]</sup>.

上述研究工作主要侧重于一种风电波动平抑下的储能配置问题,很少涉及到风电波动率对储能配置的影响.本文拟重点研究风电波动特性与储能配置之间的关系,挖掘波动率和储能功率、容量之间的内在联系,进而提出储能配置的评价指标,从而为风储系统的联合应用提供参考.

## 1 风电波动的平抑策略

对于可再生能源出力波动的平抑算法也有多种,包括一阶滤波<sup>[12]</sup>、经验模态分解<sup>[13]</sup>、小波包分

解<sup>[14]</sup>、滑动平均<sup>[15]</sup>等,这些方法由于自身的特点,常常出现过度平抑情况.而模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)策略由于具有提前预测、优先控制等特性,不会出现过度平抑情况,已被应用到风电功率波动平抑当中.通过对比模型预测控制与一阶滤波、经验模态分解、小波包分解算法,验证了模型预测控制算法在风电波动平抑中的优势<sup>[16]</sup>.模型预测控制算法中状态空间模型和滚动时域策略是核心<sup>[17]</sup>.

风电功率和储能系统的关系可表征为:

$$P_g(k+1) = P_{es}(k) + P_w(k) \quad (1)$$

式中: $P_g(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻平抑后的风电功率; $P_{es}(k)$ 为 $k$ 时刻的储能系统的功率; $P_w(k)$ 为 $k$ 时刻未平抑的风电功率.

储能的SOC(State of Charge)可以由如下公式得到:

$$SOC_{es}(k+1) = SOC_{es}(k) - T_c \cdot P_{es}(k) / C_{es} \quad (2)$$

式中: $T_c$ 为系统的采样时间; $C_{es}$ 为储能容量.

状态空间模型中状态变量 $x_1$ 、 $x_2$ 分别定义为平抑后的风电功率 $P_g$ 与储能SOC<sub>es</sub>;控制变量 $u$ 定义为储能功率 $P_{es}$ ;扰动输入量 $r$ 定义为未平抑的风电功率 $P_w$ ;输出变量 $y_1$ 、 $y_2$ 定义为 $P_g$ 和SOC<sub>es</sub>(这是个迭代的过程, $k$ 时刻的输出也是 $k+1$ 时刻的输入).

得到的状态空间方程如下:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -T_c \end{bmatrix} [F(k)] + \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用滚动时域策略的思想,对式(3)进行迭代计算,可以预测未来 $k+M$ 时刻的输出变量,利用二次规划方法对每一个控制时域进行优化,获取相应的功率指令.

由此构建本文的系统模型,将每个优化周期的储能功率平方和最小作为优化目标,即:

$$J = \min \sum_{i=k}^{k+M} P_{es}^2(i) \quad (4)$$

约束条件为:

$$P_{es\_min} \leq P_{es}(i) \leq P_{es\_max} \quad (5)$$

$$0 \leq SOC_{es}(i) \leq 1 \quad (6)$$

$$\frac{\max P_g(1,2,\dots,n) - \min P_g(1,2,\dots,n)}{P_{rated}} \leq \gamma_{2\%} \quad (7)$$

其中,式(5)为储能功率的最大值和最小值约束,式(6)为储能的SOC约束,式(7)为并网波动率约束,即特定时间内最大功率与最小功率的差值,与额定装机容量  $P_{rated}$  的比值.应用MPC平抑风电波动的流程如图1所示.

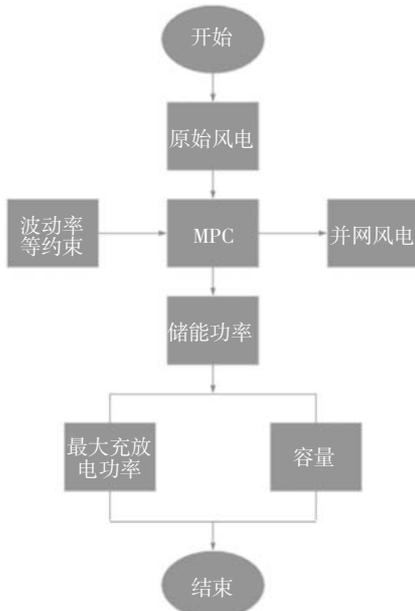


图1 MPC控制流程图

Fig.1 MPC control flow chart

## 2 从波动率角度分析不同风电的储能配置

以北方不同风电场为研究对象进行系统分析,各风电场具有相同的装机容量(100 MW)和采样率(5 s),并以1 min波动率(2%)作为并网要求.

### 2.1 波动率与储能功率的关系

针对不同波动特性的风电场,本文主要从波动率角度出发,分析平抑风电波动所需配置的储能情况.1 min风电波动率的计算公式为:

$$\gamma = \frac{\max P(1,2,\dots,n) - \min P(1,2,\dots,n)}{P_{rated}} \quad (8)$$

式中: $\max P(1,2,\dots,n)$ 为该时间窗口的最大风电功率; $\min P(1,2,\dots,n)$ 为该时间窗口的最小风电功率; $P_{rated}$ 为风电装机容量.

将模型预测控制策略应用到图2中的两组典型风电功率曲线,图3为应用模型预测控制策略平抑前后的风电波动率.由图3可知,平抑前  $WP_1$  最大波动率为0.0505,  $WP_2$  最大波动率为0.0665,即  $WP_2$

的最大波动率大于  $WP_1$  的最大波动率;平抑后两者的最大波动率均等于0.0200(2%),即平抑后风电系统具有合格的并网波动率.

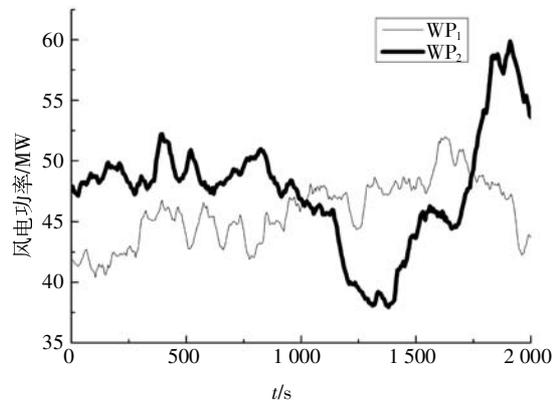
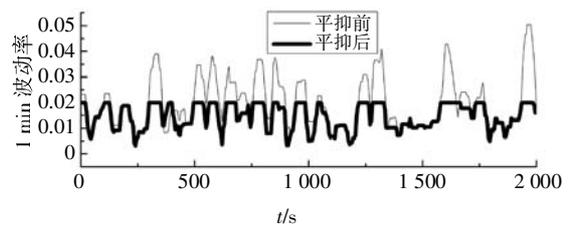
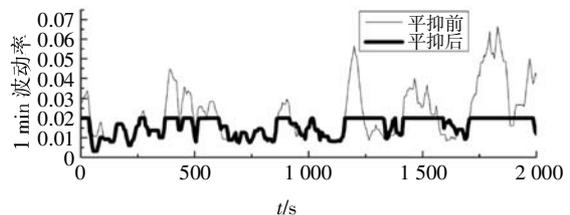


图2 两个风电场的功率曲线

Fig.2 Wind power curves of two wind farms



(a)  $WP_1$



(b)  $WP_2$

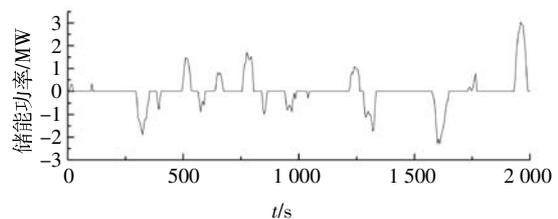
图3 平抑前后风电波动率

Fig.3 Wind power fluctuation rate before and after smoothing

图4为风电平抑所需的储能功率,可以利用式(9)计算出两组储能的最大充放电功率.

$$P_{es\_max} = \max |P_{es}(i)| \quad (9)$$

$WP_1$  最大充放电功率为3.0496 MW,  $WP_2$  最大充放电功率为8.2593 MW,  $WP_2$  最大充放电功率大于  $WP_1$  最大充放电功率.



(a)  $WP_1$

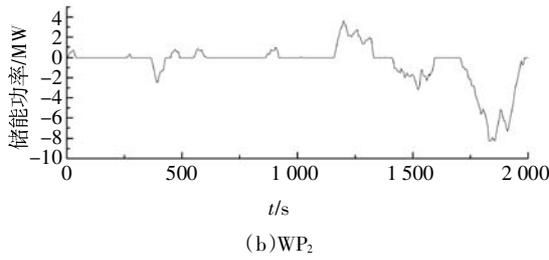


图 4 用于平抑风电波动的储能输出功率  
Fig.4 Energy storage output power for smoothing wind power fluctuation

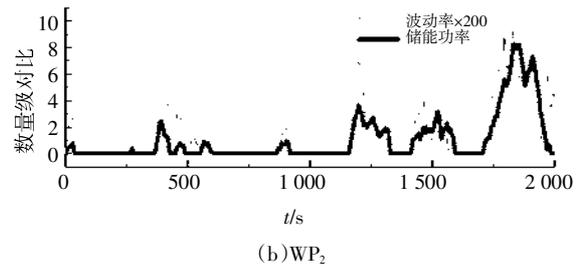


图 6 储能功率绝对值与波动率的关系  
Fig.6 The relation between energy storage absolute value power and fluctuation rate

为了分析波动率与储能功率的对应关系,我们筛选出大于 2% 的波动率,并减去 2%。为更加直观显示其对应关系,数值放大 200 倍,将其和储能功率在同一个数量级进行对比,如图 5 所示。另外,储能系统在平抑风电波动的过程中存在充电和放电两种状态,因此,其输出功率有正有负,本文取储能功率的绝对值,如图 6 所示。由此可见,储能功率和波动率成强相关关系,当风电功率的波动率大于 2% 时(即图 6 中波动率大于 0 时),均需要储能充电或放电。此外,随着波动率增大,对应的储能功率也增大;反

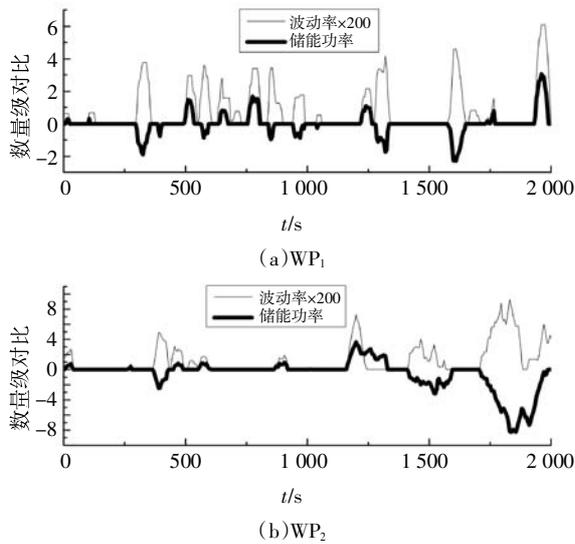
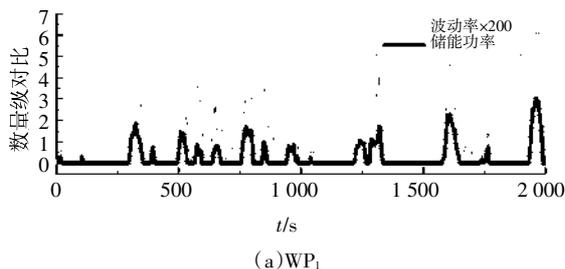


图 5 实际储能功率与波动率的关系  
Fig.5 The relation between actual energy storage power and fluctuation rate



之,则减小。当波动率达到最大时,其对应的储能功率也最大。因此,WP<sub>2</sub> 的最大波动率大于 WP<sub>1</sub>, 需配置的储能功率较大。

为了进一步验证上述结论的正确性,从波动率计算的角度进行分析,设定  $2\% < \gamma_1 < \gamma_2$ , 得到以下推导过程:

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \gamma_1 < \gamma_2 \\ &\Rightarrow \gamma_1 - 2\% < \gamma_2 - 2\% \\ &\Rightarrow \frac{\max P_1(1, 2, \dots, n) - \min P_1(1, 2, \dots, n)}{P_{\text{rated}}} - 2\% \\ &< \frac{\max P_2(1, 2, \dots, n) - \min P_2(1, 2, \dots, n)}{P_{\text{rated}}} - 2\% \\ &\Rightarrow \frac{\Delta P_1}{P_{\text{rated}}} - 2\% < \frac{\Delta P_2}{P_{\text{rated}}} - 2\% \\ &\Rightarrow \Delta P_1 - P_{\text{rated}} \times 2\% < \Delta P_2 - P_{\text{rated}} \times 2\% \\ &\Rightarrow P_{\text{es},1} < P_{\text{es},2} \end{aligned}$$

式中:  $\Delta P$  为该时间窗口内最大功率与最小功率的差值;  $P_{\text{es}}$  为需配置的储能功率。

由以上理论推导可见,风电的波动率越大,所需配置的储能功率越大。

## 2.2 波动率与储能容量的关系

基于风电波动率的概念,平抑风电波动所需的储能容量的计算公式为:

$$C = \max(E(1, 2, \dots, N)) - \min(E(1, 2, \dots, N)) \quad (10)$$

式中: 能量通过  $E(i) = \int_0^T P_{\text{es}}(i) dt$  即储能输出功率对时间的积分求得,系统的采样时间为离散时间点,因此,需要将积分形式离散化,即  $E(i) = \sum_{i=1}^N P_{\text{es}}(i) \Delta t$ 。

图 7 为平抑 WP<sub>1</sub> 和 WP<sub>2</sub> 的风电波动储能能量变化曲线,根据式(10)计算出的 WP<sub>1</sub> 容量为 0.041 2 MW·h, WP<sub>2</sub> 容量为 0.425 8 MW·h, WP<sub>1</sub> 需要配置的储能容量小于 WP<sub>2</sub>。

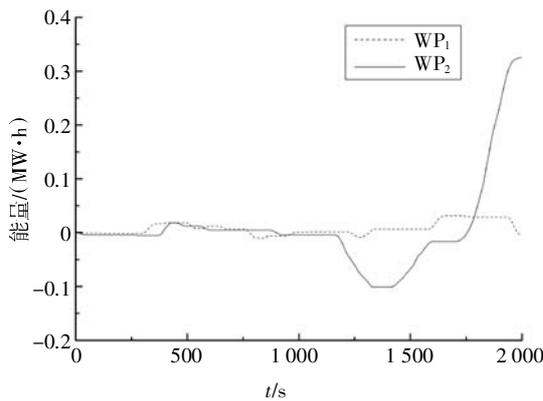


图7 储能能量曲线

Fig.7 Energy curve of energy storage

为了更好地表征波动率对储能容量的影响,本文提出了正波动率和负波动率的概念.正波动率为在1 min内,先出现功率最大值,后出现功率最小值,如式(11)所示:

$$\gamma_+ = \frac{\max_b P(1, 2, \dots, n) - \min_a P(1, 2, \dots, n)}{P_{\text{rated}}} \quad (11)$$

式中: $\max_b P(1, 2, \dots, n)$ 为1 min时间窗口内先出现的最大风电功率; $\min_a P(1, 2, \dots, n)$ 为1 min时间窗口内后出现的最小风电功率.

负波动率为在1 min内,先出现功率最小值,后出现功率最大值,如式(12)所示:

$$\gamma_- = \frac{\min_b P(1, 2, \dots, n) - \max_a P(1, 2, \dots, n)}{P_{\text{rated}}} \quad (12)$$

式中: $\min_b P(1, 2, \dots, n)$ 为1 min时间窗口内先出现的最小风电功率; $\max_a P(1, 2, \dots, n)$ 为1 min时间窗口内后出现的最大风电功率.

图8利用WP<sub>2</sub>的功率数据对正负波动率进行了说明,在360~420 s内,先出现了功率最小值 $\min_b P$ ,

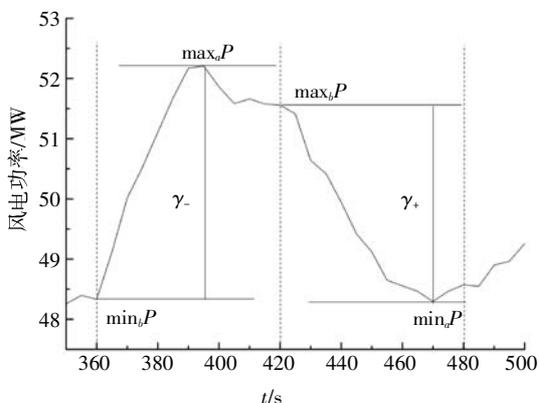


图8 正负波动率示意图

Fig.8 Schematic diagram of positive and negative fluctuation rate

为48.3307 MW;后出现功率最大值 $\max_a P$ ,为52.2085 MW,其负波动率为-3.8778%.在420~480 s内,先出现了功率最大值 $\max_b P$ ,为51.5608 MW;后出现了功率最小值 $\min_a P$ ,为48.2974 MW,其正波动率为3.2634%.由此可见,当风电含有负波动率且绝对值大于2%时,功率平抑下储能需要吸收风电功率,即储能充电;反之,正波动率时,储能放电.

根据式(10)中的能量概念,本文提出了累计波动率(Cumulative Fluctuation, CF),即整个时间尺度内,将超出2%的正负波动率进行累计,可以得到累计波动率的变化曲线,如图9所示.累计波动率的变化和储能能量的变化呈对应关系,即正波动率时,储能放电,功率为正;反之为负.

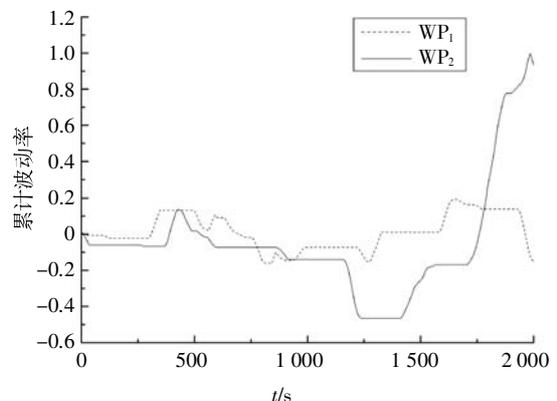


图9 累计波动率曲线

Fig.9 Cumulative fluctuation rate curve

在累计波动率的基础上,提出应用累计波动率差值评估储能容量配置的方法.累计波动率差值(Cumulative Fluctuation Deviation, CFD)与储能容量的计算方式类似,具体如下:

$$\text{CFD} = \max(\text{CF}(1, 2, \dots, N)) - \min(\text{CF}(1, 2, \dots, N)) \quad (13)$$

由式(13)计算出的WP<sub>1</sub>的累计波动率差值为0.3576,WP<sub>2</sub>的波动率差值为1.4626,WP<sub>1</sub>的累计波动率差值小于WP<sub>2</sub>,由此可得,在WP<sub>1</sub>累计波动率差值小于WP<sub>2</sub>时,其容量也小于WP<sub>2</sub>.

### 3 算例分析

为了进一步验证波动率和储能配置之间的关系,对以下3类算例进行分析:1)一组风电的波动率在每一时刻都大于另一组风电的波动率;2)一组风电在某波动率范围内的功率点数均大于另一组风电在相同波动率范围内的功率点数;3)两组风电之间

没有上述两种情况的关系,即随机选取的两组风电.

### 3.1 标准正弦风电系统

构建了如下两组同频率不同幅值标准正弦风电系统:

$$\begin{aligned} A_1 &= 40 + 15 \times \sin(2 \times \pi \times x \times 0.005) \\ A_2 &= 70 + 13 \times \sin(2 \times \pi \times x \times 0.005) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $A_1$ 、 $A_2$  分别表示风电系统 1 和 2 的输出功率,单位为 MW; $x$  表示时间,单位为 s.

图 10 为两个风电场风电功率波动平抑前后的示意图,可以看出,利用储能系统对  $A_1$  和  $A_2$  的风电功率进行平抑后, $A_1$  功率波动范围由 30 MW 变为 4 MW 了, $A_2$  由 26 MW 变为了 4 MW,两者波动均大幅度减小,且前者降低得更多.

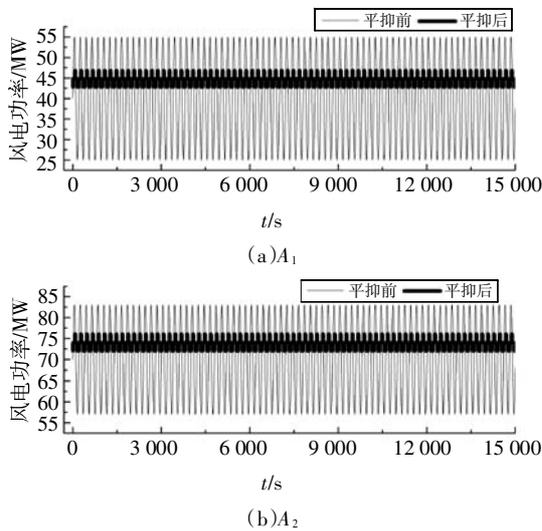


图 10 平抑前后风电功率曲线

Fig.10 Curves of wind power before and after smoothing

图 11 中平抑前  $A_1$  的波动率范围为 0.061 8~0.242 7, $A_2$  的波动率范围为 0.053 6~0.210 3,两者的波动率均在 2%之上, $A_1$  的波动率之和为 501.291, $A_2$  的波动率之和为 434.449 5,且  $A_1$  的最大波动率大于  $A_2$  的最大波动率,经过平抑后两者的波动率都不超过 2%.从图 12 的储能功率曲线可以得出, $A_1$  配置的储能最大充放电功率为 21.971 7 MW, $A_2$  配置的储能最大充放电功率为 18.775 5 MW, $A_1$  配置的储能最大充放电功率大于  $A_2$ .

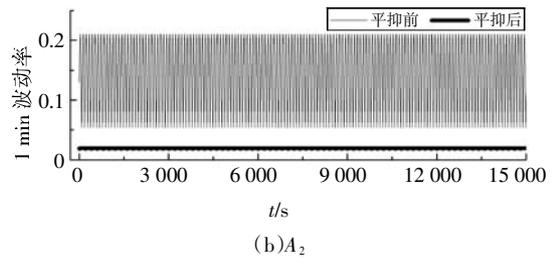
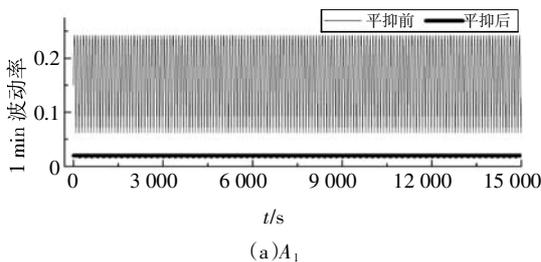


图 11 平抑前后风电波动率曲线

Fig.11 Curves of wind power fluctuation rate before and after smoothing

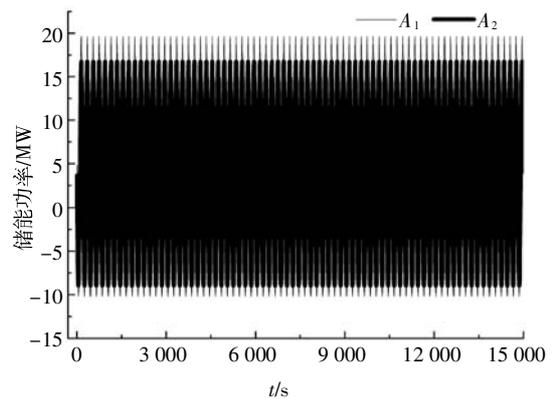


图 12 储能功率曲线

Fig.12 Curves of energy storage power

将  $A_1$  和  $A_2$  的原始波动率相减得到的差值均为正值,如图 13 所示.由此可见,在每个时间点上, $A_1$  的波动率均大于  $A_2$ ,求得  $A_1$  的容量为 19.183 7 MW·h, $A_2$  的容量为 15.818 5 MW·h, $A_1$  配置的储能容量大于  $A_2$ .

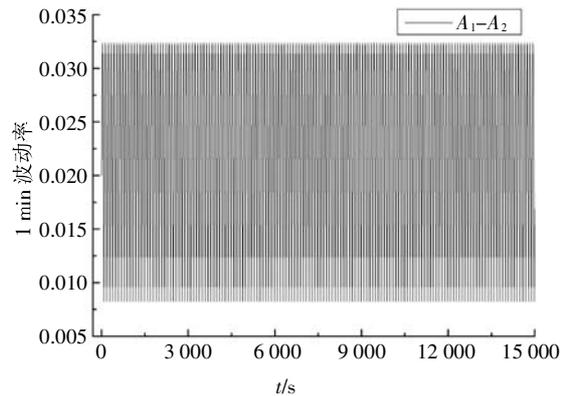


图 13 波动率差值曲线

Fig.13 Curves of fluctuation rate difference

针对同频率不同幅值的两组正弦风电,虽然  $A_2$  的功率幅值大于  $A_1$ ,但是  $A_1$  的最大波动率大于  $A_2$ , $A_1$  配置的储能最大充放电功率大于  $A_2$ ,由此可得,配置的储能功率与风电的功率幅值无关,与功率幅值的变化值有关;此外,在所有时间点上, $A_1$  的波动

率均大于  $A_2$ , 所以  $A_1$  配置了较大的储能容量.

### 3.2 实际风电系统案例 1

图 14 为平抑前后的两组实际风电功率曲线,  $W_1$  的功率波动范围值由 16.157 0 MW 变为了 15.990 5 MW,  $W_2$  的功率波动范围值由 27.849 9 MW 变为 26.585 7 MW, 前者降低了 1.03%, 后者降低了 4.54%, 两者的功率波动均减小, 且  $W_2$  减小得更多.

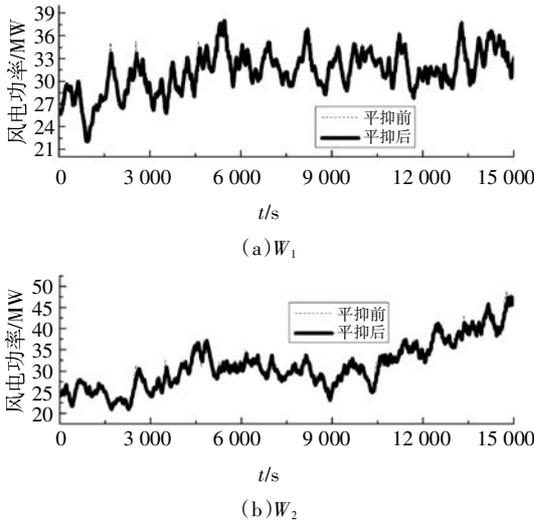


图 14 平抑前后风电功率曲线

Fig.14 Curves of wind power before and after smoothing

图 15 中  $W_1$  平抑前最大波动率为 0.046 9, 超出 2% 的功率点数为 530 个, 超出 2% 的波动率之和为 3.025 2;  $W_2$  平抑前最大波动率为 0.061 6, 超出 2% 的功率点数为 705 个, 超出 2% 的波动率之和为 6.026 3, 两者平抑后波动率均不大于 2%. 从图 17 可以看出,  $W_1$  的储能需配置 2.689 6 MW 的最大充放电功率,  $W_2$  的储能需配置 4.1580 2 MW 的最大充放电功率.

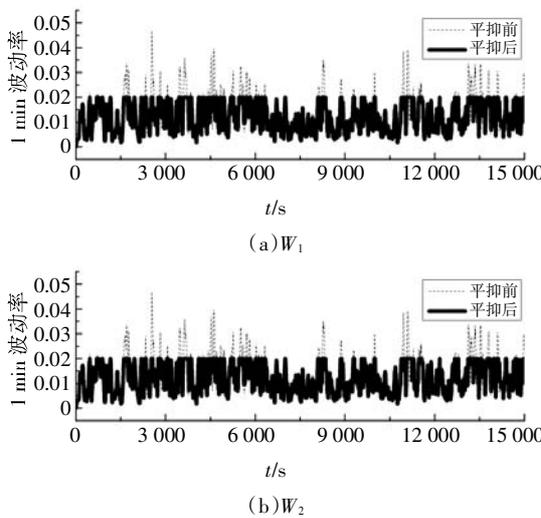


图 15 平抑前后波动率曲线

Fig.15 Curves of fluctuation rate before and after smoothing

从图 15 可以看出, 在相同的时间点,  $W_1$  与  $W_2$  相比, 其波动率有大有小, 即在整个时间范围内, 没有一个风电的波动率完全大于另一个. 为此, 分别统计了大于 2% 波动率的功率点数, 如图 16 所示. 大于 2% 的以及每增加 1% 对应的功率点数,  $W_2$  均大于  $W_1$ . 通过图 17 中的储能功率曲线, 计算求得  $W_1$  的储能容量为 0.142 3 MW·h,  $W_2$  的储能容量为 0.568 6 MW·h.

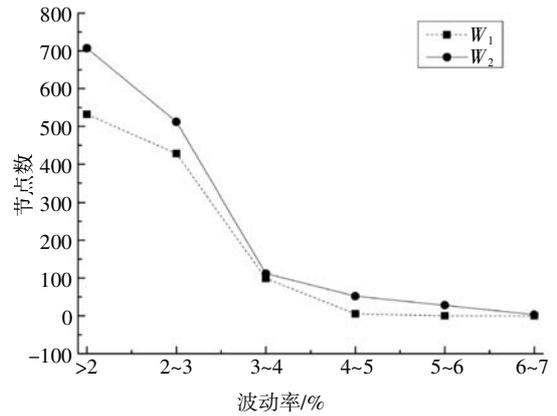


图 16 波动率统计

Fig.16 Fluctuation rate statistic

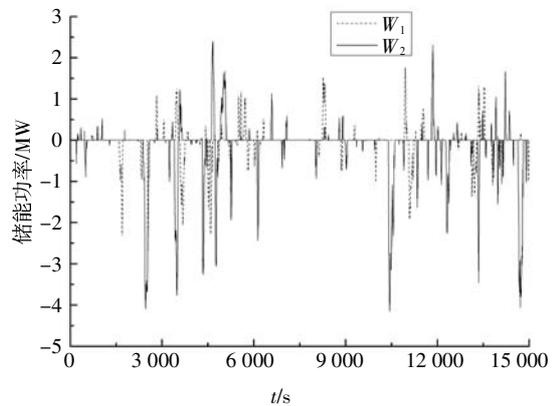


图 17 储能功率曲线

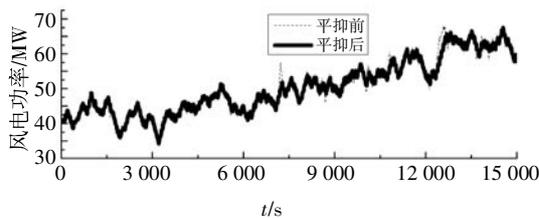
Fig.17 Curves of energy storage power

因此,  $W_2$  的最大波动率较大, 分析结果表明需配置的储能最大充放电功率较大; 从统计的角度来看, 由于风电  $W_2$  在每个波动率时段含有的功率点数均大于  $W_1$ , 其所配置的储能容量较大.

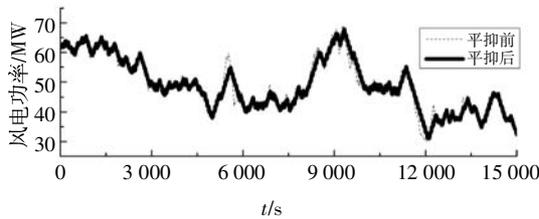
### 3.3 实际风电系统案例 2

从图 18 和 19 分析可得, 本文所提的控制策略能够使风电具有友好的并网波动率. 图 18 中  $W_3$  的功率波动范围值由 34.140 1 MW 变为 33.298 3 MW, 降低 2.47%,  $W_4$  的功率波动范围值由 39.024 1 MW 变为 36.889 2 MW, 降低 5.47%, 后者波动降低较多. 图 19 中  $W_3$  平抑前的波动率最大为 0.080 6, 波动率

超过 2% 的功率点数为 1662 个,波动率之和 19.2422;  $W_4$  平抑前的波动率最大为 0.0968,波动率超过 2% 的功率点数为 1514 个,波动率之和为 19.3316.  $W_4$  虽然波动率超过 2% 的功率点数较少,但是最大波动率和超过 2% 波动率之和均较大.  $W_3$  和  $W_4$  平抑后的波动率均不超过 2%, 通过图 21 可以求得  $W_3$  的储能最大充放电功率为 7.8274 MW,  $W_4$  的储能最大充放电功率为 8.9066 MW.



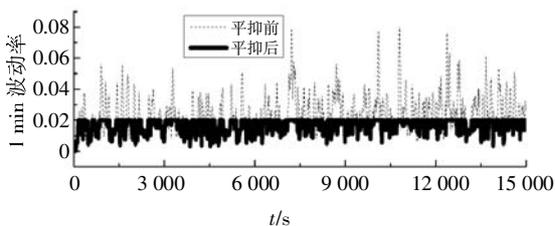
(a)  $W_3$



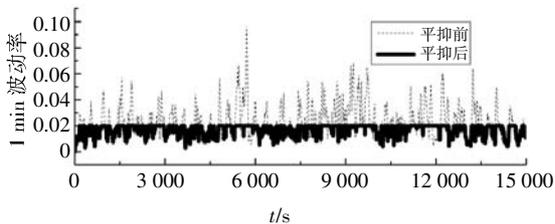
(b)  $W_4$

图 18 平抑前后风电功率曲线

Fig.18 Curves of wind power before and after smoothing



(a)  $W_3$



(b)  $W_4$

图 19 平抑前后波动率曲线

Fig.19 Curves of fluctuation rate before and after smoothing

从图 19 中可以看出,  $W_3$  比  $W_4$  的波动率有大有小;图 20 统计了不同波动率段的功率点数,  $W_3$  比  $W_4$  也是有大有小.

此时通过式(13)计算出  $W_3$  的累计波动率差值

为 2.2634,  $W_4$  的累计波动率差值为 3.4788;通过图 21 的储能功率曲线, 计算出  $W_3$  储能容量为 0.8035 MW·h,  $W_4$  储能容量为 1.0311 MW·h. 因此, 波动率较大的风电需要配置较大的储能功率, 累计波动率差值越大, 需配置的储能容量也越大.

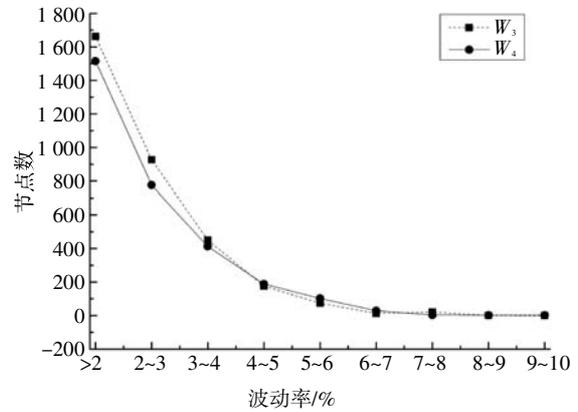


图 20 波动率统计

Fig.20 Fluctuation rate statistic

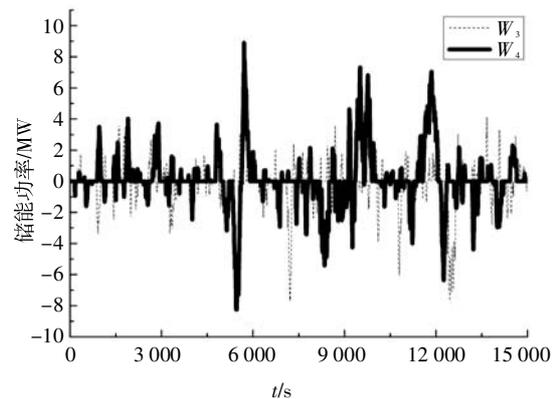


图 21 储能功率曲线

Fig.21 Curves of energy storage power

为了验证累计波动率差值的普适性, 在相同时间尺度上统计算例中的 6 组风电的累计波动率差值和容量, 如表 1 所示.

表 1 波动率差值与储能容量

Tab.1 The smoothing variance and energy storage capacity

风电	累计波动率差值	容量/(MW·h)
$A_1$	101.0034	19.1837
$A_2$	91.6518	15.8186
$W_1$	0.6564	0.1423
$W_2$	1.5404	0.5686
$W_3$	2.2634	0.8035
$W_4$	3.4788	1.0311

从表 1 可以看出, 不同的累计波动率差值, 对应

的储能容量不同;较大的累计波动率差值,配置的储能容量也较大.因此,应用累计波动率差值作为储能容量配置的评价指标具有合理性.

## 4 结论

本文提出了考虑风电波动率概念的储能系统优化配置方法,利用MPC算法平抑风电的功率波动,并基于风电波动率对储能系统的优化配置进行分析,得出以下结论:

1)随着风电波动率的变化,配置的储能系统功率与其成正相关关系,波动率较大的风电场配置的储能功率也较大;针对不同波动特性的风电系统,最大波动率与储能最大充放电功率的配置也显示出正相关关系.

2)针对3类不同波动率的典型实际场景进行分析表明,当 $A_1$ 的波动率均大于 $A_2$ 时, $A_1$ 配置的储能容量大于 $A_2$ ;当 $W_1$ 各波动率段的功率点数大于 $W_2$ 时, $W_1$ 配置的储能容量大于 $W_2$ ;而当 $W_3$ 和 $W_4$ 的波动率不能直接对比时,可应用累计波动率差值进行容量的对比分析.即在正负波动率的基础上,提出并应用累计波动率差值作为储能容量的评价指标,其数值越大的风电系统,需配置的储能容量也越大.

本研究所提出的累计风电波动率的概念可为储能系统的优化配置提供理论基础,对风电场的储能规划与运行控制具有一定的参考价值.另外,在今后的研究工作中,将进一步研究储能参与市场交易的策略以及可能的盈利模式,从而加快储能的产业化进程.

## 参考文献

- [1] SORNSEN P, CUTULULISN A, VIGUERAS-RODRIGUEZ A, *et al.* Power fluctuations from large wind farms [J]. IEEE Transaction on Power System, 2007, 22(3): 958—965.
- [2] YUAN X M. Overview of problems in large scale wind integrations [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22—25.
- [3] 牛东晓, 赵东来, 杨尚东, 等. 考虑综合成本的海上风电与远方清洁能源协同优化模型 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(12): 16—24.  
NIU D X, ZHAO D L, YANG S D, *et al.* Collaborative optimization model of offshore wind power and remote clean energy considering comprehensive cost in power system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(12): 16—24. (In Chinese)
- [4] ESMAILI A, NOVAKOVIC B, NASIRI A, *et al.* A hybrid system of Li-ion capacitors and flow battery for dynamic wind energy support [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1649—1657.
- [5] ZHANG Y X, DONG Z Y, LUO F J, *et al.* Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8): 1105—1113.
- [6] WANG X Y, VILATHGAMUWA D M, CHOI S S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(3): 868—878.
- [7] 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 T, OUYANG Z K, LI Z, *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. (In Chinese)
- [8] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1—8.  
WANG C S, YU B, XIAO J, *et al.* Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1—8. (In Chinese)
- [9] 张峰, 董晓明, 梁军, 等. 考虑目标分解及其互补平抑的风电场复合储能容量优化 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 9—15.  
ZHANG F, DONG X M, LIANG J, *et al.* Capacity optimization of hybrid energy storage based on target decomposition and complementary fluctuations smoothing [J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(7): 9—15. (In Chinese)
- [10] 孙承晨, 袁越, CHOI San Shing, 等. 基于经验模态分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 19—26.  
SUN C C, YUAN Y, CHOI S S, *et al.* Capacity optimization of hybrid energy storage systems in microgrid using empirical mode decomposition and neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 19—26. (In Chinese)
- [11] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363—1372.
- [12] DIAZ-GONZALEZ F, BIANCHI F D, SUMPER A, *et al.* Control of a flywheel energy storage system for power smoothing in wind power plants [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 204—214.
- [13] 韩晓娟, 田春光, 程成, 等. 基于经验模态分解的混合储能系统功率分配方法 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 1889—1896.  
HAN X J, TIAN C G, CHENG C, *et al.* Power allocation method of hybrid energy storage system based on empirical mode decomposition [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1889—1896. (In Chinese)
- [14] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7—12.  
WU J, DING M. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition [J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(3): 7—12. (In Chinese)
- [15] 刘春燕, 晁勤, 魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 35—41.  
LIU C Y, CHAO Q, WEI L L. Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 35—41. (In Chinese)
- [16] SUN Y S, TANG X S, SUN X Z, *et al.* Model predictive control and improved low-pass filtering strategies based on wind power fluctuation mitigation [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 512—524.
- [17] 孙玉树, 李星, 唐西胜, 等. 应用于微网的多类型储能多级控制策略 [J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 181—188.  
SUN Y S, LI X, TANG X S, *et al.* Multi-level control strategy of multi-type energy storages for microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 181—188. (In Chinese)