

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210931

# 考虑复杂海洋气候条件影响的海上风电场储能容量配置研究

时帅<sup>1</sup>, 吴慧娴<sup>1</sup>, 黄冬梅<sup>1</sup>, 胡安铎<sup>2</sup>, 宋巍<sup>3</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学电子与信息工程学院, 上海 200090;  
3. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306)

**摘要:** 复杂的海洋气候条件会影响到海上风电场风功率预测的精度, 储能系统可有效补偿风功率预测误差。提出一种考虑风功率预测误差不确定性的海上风电场储能容量配置方法。首先, 通过组合预测模型预测风速, 根据风功率-风速关系求得风功率预测值, 与实测值比较得到风功率预测误差。然后, 以储能配置的功率成本与容量成本之和最小为目标, 建立利用储能将风功率预测误差补偿至允许区间内的鲁棒机会约束模型, 并采用凸近似和抽样平均方法将模型转换为线性规划形式实现高效求解。最后, 在算例中分析台风事件对海上风电场储能配置的影响, 验证了所提模型在处理风功率预测误差不确定性时能有效兼顾补偿效果与经济性。研究成果可为今后深远海风电场大规模配置储能提供有力支撑。

**关键词:** 海上风电场; 储能配置; 鲁棒机会约束; 海洋气候; 风功率预测误差

## Energy storage capacity configuration of an offshore wind farm considering the influence of complex ocean climate conditions

SHI Shuai<sup>1</sup>, WU Huixian<sup>1</sup>, HUANG Dongmei<sup>1</sup>, HU Anduo<sup>2</sup>, SONG Wei<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
3. School of Information, Shanghai University of Ocean, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Complicated ocean climatic conditions will affect the accuracy of wind power prediction for offshore wind farms, and energy storage can effectively compensate for wind power prediction errors. A method for energy storage capacity allocation of offshore wind farms considering the uncertainty of wind power forecast errors is proposed. First, a combined prediction model is used to predict the wind speed, obtaining the predicted value of wind power according to the relationship between wind power and wind speed, and comparing it with the actual measured value to obtain the wind power prediction error. Then, the goal is to minimize the sum of power cost and capacity cost of energy storage configuration. A robust chance constraint model that uses energy storage to compensate for the wind power prediction error to within the allowable interval is proposed, and the convex approximation and sampling average method are used to convert the model into a linear programming form to achieve an efficient solution. Finally, the impact of a typhoon event on the energy storage configuration of offshore wind farms is analyzed in the calculation example, and it is verified that the proposed model can effectively balance compensation effect and economy when dealing with the uncertainty of wind power forecast errors. The results can provide strong support for the large-scale deployment of energy storage in offshore wind farms in the future.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977128).

**Key words:** offshore wind farm; energy storage configuration; robust opportunity constraint; ocean climate; wind power prediction error

## 0 引言

近年来, 风电场选址从陆地走向海洋, 从近海

走向远海, 海上风电的发展为实现“双碳”目标添砖加瓦<sup>[1-3]</sup>。随着风电规模不断扩大, 风功率预测误差导致的弃风量已不可忽视<sup>[4-5]</sup>。储能系统具有灵活的充放电特性, 为风电场配置储能可有效补偿风功率预测误差, 提高电网对风电的消纳水平<sup>[6]</sup>。

国内外学者已经在储能补偿风功率预测误差方面开展了许多研究。文献[7-8]采用非正态分布描述

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51977128); 上海市青年科技启明星计划项目资助(21QC1400200); 上海市自然科学基金项目资助(21ZR1425400)

风功率预测误差的随机性, 考虑补偿风功率预测误差的置信度机会约束建立了储能优化配置模型。文献[9]通过风电出力的实际值与预测值之差得到风功率预测误差, 建立了以储能成本与备用容量成本之和最小为目标的储能容量配置模型。文献[10-11]通过分区拟合的方法先对风功率预测误差分区, 再对每个区间均用 $\beta$ 分布拟合后加权求得整个区域的概率分布函数。上述研究在考虑风功率预测误差时, 均求得随机变量对应的概率分布函数, 但实际应用中较难获得精确的概率分布函数。

采用区间范围描述风功率预测误差的随机性, 通过鲁棒优化等方法将不确定性模型转换为线性规划模型求解, 可避免在建模及求解过程中对随机变量概率分布函数的依赖性。文献[12-13]考虑风电不确定性建立了含分布鲁棒机会约束的储能容量配置模型, 采用拉格朗日对偶消去等方法将模型转换为线性规划形式求解。文献[14-15]以满足风功率全消纳需配置储能的最小容量为优化目标, 提出了一种含多风电场的储能优化配置方法, 通过鲁棒线性优化方法将不确定性模型转换为确定性模型求解。文献[16]建立了基于风功率预测误差聚类的含储能分布鲁棒机组组合模型。采用列约束生成(C&CG)算法对转化后的模型进行求解。文献[17]建立了以储能成本、越限惩罚成本及限电损失成本之和最小为目标的储能容量配置模型, 通过大 M 法将模型转换为混合整数线性规划形式求解。

上述所有储能容量配置研究均针对于陆上风电场, 并未考虑到复杂的海洋气候条件对海上风电场储能容量配置的影响, 研究结果的参考价值具有局限性。

考虑影响到海上风电场风功率预测的复杂海洋气候条件, 如台风、雷暴等。文献[18]分析了 2019 年台风“白露”对我国东南湾高铁大桥风电场风速的影响。文献[19]建立了一种考虑数值天气预报中多种气象因素和风速空间相关性的组合加权风功率预测模型。文献[20-21]基于数值天气预报信息, 提出了一种考虑台风影响的风速预测模型。在已有的风功率预测研究中, 考虑到海洋气候对预测的影响的文献较少。

综上所述, 本文通过台风事件具体分析复杂海洋气候条件对风功率预测的影响, 提出了一种计及风功率预测误差不确定性的海上风电场储能容量配置方法。利用储能将风功率预测误差补偿至合理区间内, 并考虑为鲁棒机会约束加入储能容量配置模型, 通过凸近似等手段将模型转换为确定性模型求解。采用国内某海上风电场的实测数据进行算例分

析, 仿真了台风事件全过程对海上风电场储能配置的影响。该研究可为海上风电场配置储能提供借鉴。

## 1 风功率预测误差分析

### 1.1 复杂海洋气候条件对风速预测的影响

当出现台风、雷暴等复杂海洋气候时, 海上风电机组周围环境的气象因素会发生改变。利用自动相关判定(Automatic Relevance Determination, ARD)算法筛选出数值天气预报的气象数据中与风速相关性最大的几个因素, 其中风速、风向、温度、湿度、气压这五种气象因素对应的 ARD 系数较小, 表明其对风速预测的影响程度较大<sup>[19]</sup>。将这五种气象因素作为风速预测模型的输入。

### 1.2 风功率预测误差建模

采用变分模式分解(Variational Mode Decomposition, VMD)与门控循环单元(Gate Recurrent Unit, GRU)组合而成的 VMD-GRU 预测模型<sup>[22]</sup>对下一时刻的风速进行预测。记 VMD 模型的预测值为 $v_1$ , GRU 模型的预测值为 $v_2$ , 加权平均后的组合预测值为 $v_0$ 。组合预测模型为

$$v_0 = w_1 v_1 + w_2 v_2 \quad (1)$$

式中,  $w_1$ 、 $w_2$  为相应的权重系数, 且  $w_1 + w_2 = 1$ 。

根据风功率-风速关系<sup>[23]</sup>可求得风速预测值对应的风功率预测值。

风功率预测误差由风功率实测值与预测值比较得到,  $t$  时刻的预测误差为

$$\Delta P_w(t) = P_r(t) - P_w(t) \quad (2)$$

式中:  $P_r(t)$  为  $t$  时刻风功率实测值;  $P_w(t)$  为  $t$  时刻风功率预测值;  $\Delta P_w(t)$  为正值时表示风功率实测值高于预测值, 否则, 反之。

采用均方根误差占风电场总装机容量的百分比  $e_{\text{RMSE,P}}$  作为风功率预测误差衡量指标。

$$e_{\text{RMSE,P}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^K (P_w(t) - P_r(t))^2 / K}}{P_{w,\text{total}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $K$  为预测值的个数;  $P_{w,\text{total}}$  为风电场总装机容量。均方根误差百分比  $e_{\text{RMSE,P}}$  越大, 预测的精度越低。

### 1.3 风功率预测误差与储能配置的关系

配置储能系统的风电场, 风功率预测误差由储能承担, 即

$$\begin{cases} P_{\text{B-down}} = \Delta P_w(t), \Delta P_w(t) > 0 \\ P_{\text{B-on}} = -\Delta P_w(t), \Delta P_w(t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{B-down}}$  为储能系统吸收的功率;  $P_{\text{B-on}}$  为储能

系统释放的功率。

实际情况中,风功率预测误差若在允许范围内,则不需要补偿,超出范围时,通过储能系统充、放电将其补偿至误差允许区间内<sup>[24]</sup>。如图1所示,预测误差在 $[-a, a]$  ( $a \geq 0$ ) 内时,储能不动作,超出 $[-a, a]$  时,储能动作。当 $\Delta P_w(t) > a$  时,即图中 $t_1-t_2$ 、 $t_5-t_6$  时段,储能吸收功率,吸收的能量大小为 $E_1$ 、 $E_3$  阴影部分的面积;当 $\Delta P_w(t) < -a$  时,即图中 $t_3-t_4$  时段,储能释放功率,释放的能量大小为 $E_2$  阴影部分的面积。

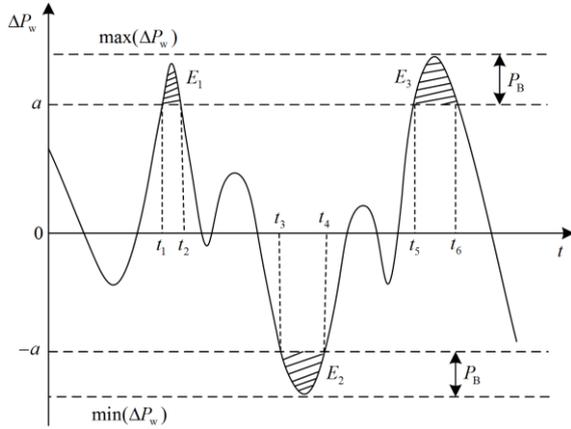


图1 风功率预测误差曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind power prediction error curve

假配置的储能容量满足补偿要求,阴影部分的面积为

$$E_i = \int_{t_{2i-1}}^{t_{2i}} \Delta P_w dt \quad (5)$$

储能充、放第 $n$ 个阴影面积后,储能的能量为

$$E_n = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \quad (6)$$

式中, $E_0$  为储能的初始能量。

测试时间段内,经过总共 $k$ 次充放电,需配置的储能能量为

$$E = \max E_k - \min E_k \quad (7)$$

## 2 储能容量配置模型

### 2.1 用于补偿风功率预测误差的储能容量配置模型

#### 2.1.1 风功率预测误差平抑约束

风功率预测误差为风电实际出力与预测出力之差,且实际出力应在0和出力上限之间,即

$$\begin{cases} \Delta P_w = P_r - P_w \\ 0 \leq P_r \leq P_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta P_w$  为风功率预测误差; $P_r$  为风电实际出力; $P_w$  为风电预测出力; $P_{\max}$  为风电出力上限。

针对 $\Delta P_w$ 的不确定性,区别于其他文献将其简单限制在一定数值内,本文提出利用储能系统将 $\Delta P_w$  补偿至允许区间范围内的约束。

$$-a \leq \Delta P_w + P_B \leq a \quad (9)$$

式中, $P_B$  为储能充放电功率。 $P_B$  大于0,储能放电, $P_B$  小于0,储能充电。

由于 $\Delta P_w$  会有小概率出现较大值,若仍用储能对其进行补偿,则需要较大储能功率容量,使储能配置成本过高,造成不必要的浪费,故将式(9)描述为鲁棒机会约束。

$$\Pr \{-a \leq \Delta P_w + P_B \leq a\} \geq 1 - \varepsilon \quad (10)$$

式(10)表示满足误差平抑要求的概率不小于置信度 $1 - \varepsilon$ 。

#### 2.1.2 储能鲁棒机会约束容量配置模型

为风电场配置储能,在保证一定误差平抑效果的同时,追求经济性最优,故本文提出如下储能容量配置模型。

目标函数为储能配置的总成本最小,即

$$\min(C_p P_B + C_E E_B) \quad (11)$$

式中: $C_p$  为储能单位功率成本; $C_E$  为储能单位容量成本; $P_B$ 、 $E_B$  分别为配置的储能功率、容量。

约束条件如下。

#### 1) 储能充放电功率约束

$$-P_{B\max} \leq P_B \leq P_{B\max} \quad (12)$$

式中, $P_{B\max}$  为储能功率配置的上限值。

#### 2) 储能容量约束

$$C_{\text{SOCmin}} E_{B\max} \leq E_B \leq C_{\text{SOCmax}} E_{B\max} \quad (13)$$

式中: $C_{\text{SOCmin}}$ 、 $C_{\text{SOCmax}}$  分别为储能荷电状态的下限与上限; $E_{B\max}$  为储能容量配置的限值。

#### 3) 风功率预测误差平抑约束

$$\Pr \{-a \leq \Delta P_w + P_B \leq a\} \geq 1 - \varepsilon \quad (14)$$

### 2.2 储能容量配置模型的转换

上述储能容量配置模型含有鲁棒机会约束,非凸难以直接求解,本文采用凸近似方法实现约束的转化<sup>[12]</sup>。

首先,式(14)可改写为

$$\Pr \{|\Delta P_w + P_B| \leq a\} \geq 1 - \varepsilon \quad (15)$$

式(15)等价于:

$$E_{P_0}(R(|\Delta P_w + P_B|)) = \Pr \{|\Delta P_w + P_B| > a\} \leq \varepsilon \quad (16)$$

式中, $E_{P_0}(\cdot)$  为参考分布 $P_0$  下的期望函数,本文考虑 $P_0$  为正态分布。 $R(x)$  定义如下:

$$R(x) = \begin{cases} 1, & x > a \\ 0, & x \leq a \end{cases} \quad (17)$$

此时, 问题转化为针对  $E_{p_0}(R(|\Delta P_w + P_B|))$  的求解。

引入一个凸函数  $T(x)$  对  $R(x)$  进行凸近似, 使式 (18) 成立。

$$E_{p_0}(R(|\Delta P_w + P_B|)) \leq E_{p_0}(T(|\Delta P_w + P_B|)) \leq \varepsilon \quad (18)$$

$T(x)$  的表达式为

$$T(x) = \max \left\{ 0, \frac{x}{\beta} + 1 \right\} \quad (19)$$

式中,  $\beta$  为大于 0 的常数。

经验证, 只要  $E_{p_0}(T(|\Delta P_w + P_B|)) \leq \varepsilon$  成立, 则必然有  $E_{p_0}(R(|\Delta P_w + P_B|)) \leq \varepsilon$  成立, 故问题可转化为针对  $E_{p_0}(T(|\Delta P_w + P_B|))$  的求解。

采用抽样平均方法处理期望函数  $E_{p_0}(\cdot)$ 。先取  $N$  个典型样本  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ , 样本对应的概率分别为  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$ , 可将  $E_{p_0}(T(|\Delta P_w + P_B|)) \leq \varepsilon$  转化为

$$\sum_{n=1}^N \pi_n \cdot \max \left\{ 0, \frac{|\Delta P_w(\xi_n) + P_B|}{\beta} + 1 \right\} \leq \varepsilon \quad (20)$$

最后, 引入辅助变量  $\phi_n$ , 将式(20)等价如下线性形式。

$$\begin{cases} |\Delta P_w(\xi_n) + P_B| + \beta \leq \phi_n, \phi_n \geq 0 \quad \forall n \\ \sum_{n=1}^N \pi_n \cdot \phi_n \leq \beta \cdot \varepsilon \quad \beta > 0 \end{cases} \quad (21)$$

至此, 将原鲁棒机会约束转化为了线性约束。

通过上述约束转化, 储能容量配置模型可转换为线性规划形式。

$$\begin{cases} \min(C_p \cdot P_B + C_E \cdot E_B) \\ \text{s.t. 式(12)、式(13)} \\ |\Delta P_w(\xi_n) + P_B| + \beta \leq \phi_n, \phi_n \geq 0 \quad \forall n \\ \sum_{n=1}^N \pi_n \cdot \phi_n \leq \beta \cdot \varepsilon, \beta > 0 \end{cases} \quad (22)$$

建模过程的简要流程如图 2 所示。

### 3 算例分析

以国内某装机容量为 100 MW 的海上风电场实测出力数据及预测出力数据为基础, 进行算例分析, 其中数据的采样间隔时间为 10 min, 配置储能的单位功率成本为 110 万元/MW, 单位容量成本为 150 万元/MWh。

#### 3.1 储能对于风电波动的平抑效果

利用 K-means 聚类算法<sup>[25]</sup>对全年的风电功率数据进行聚类, 得到春夏秋冬四个季节的典型日风电聚类曲线, 如图 3 所示。图 3 可反映一定程度的

四季风电出力波动。以该海上风电场两个月的风电出力情况来说明, 为其配置额定功率为 10 MW、额定容量为 20 MWh 储能时, 储能平抑风电波动效果如图 4 所示。由图 4 可以看出, 平抑后的风电功率曲线明显较平抑前更平滑。对应的储能充放电功率曲线和能量变化曲线如图 5 所示。为了平抑风电功率波动, 储能系统在风电出力较大时吸收功率, 在风电出力较小时释放功率。

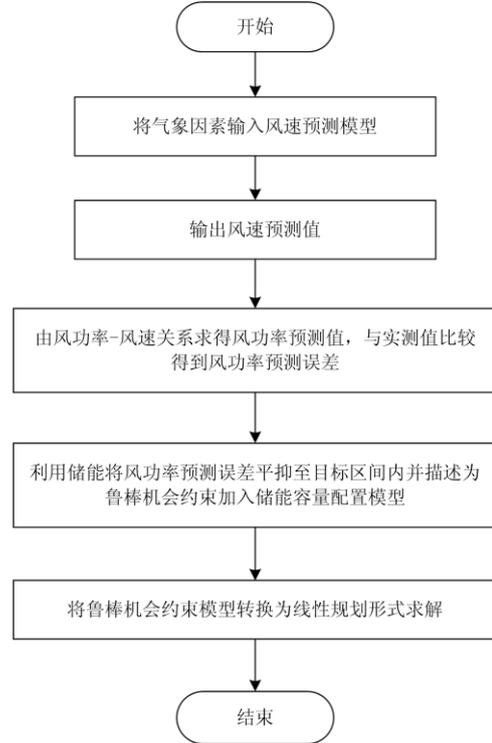


图 2 建模过程流程图

Fig. 2 Modeling process flow chart

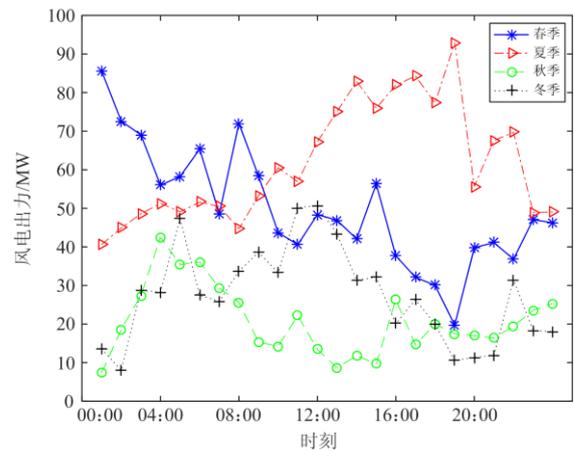


图 3 春夏秋冬四个季节的典型日风电聚类曲线

Fig. 3 Typical daily wind power clustering curves in the four seasons of spring, summer, autumn and winter

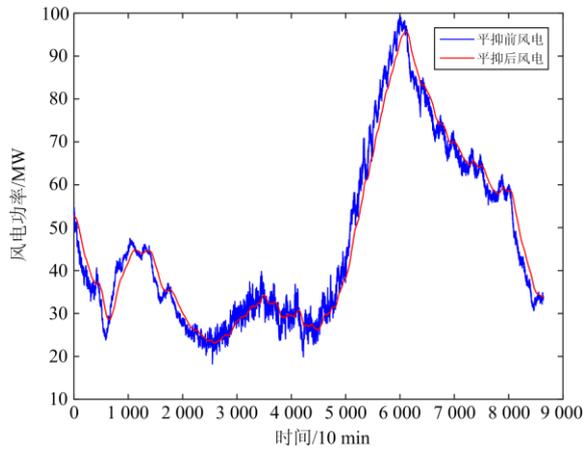


图 4 风电平滑前后的时序功率曲线

Fig. 4 Time series power curve before and after wind power smoothing

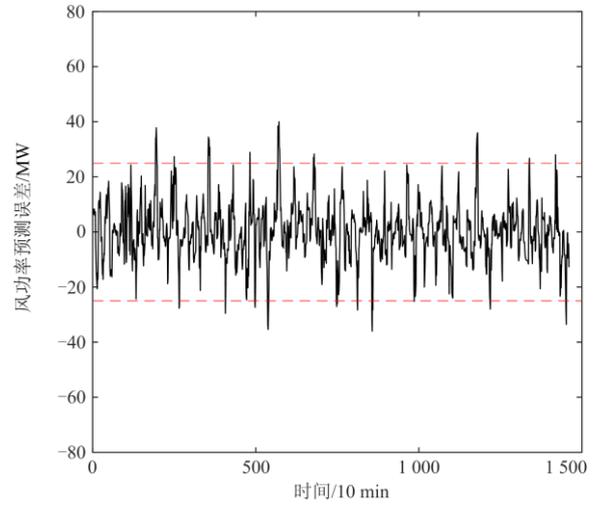


图 6 风功率预测误差曲线

Fig. 6 Wind power prediction error curve

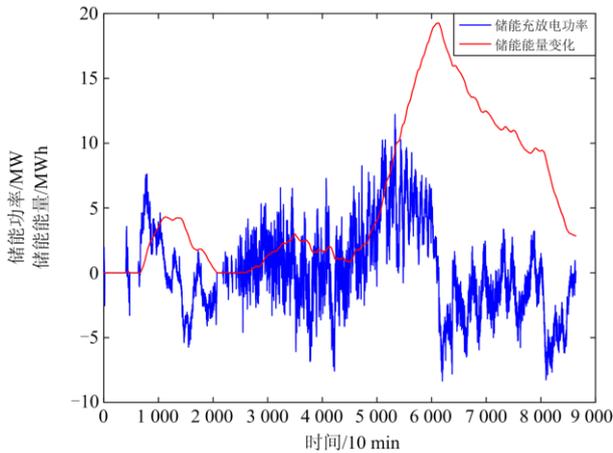


图 5 储能充放电功率与能量变化曲线

Fig. 5 Energy storage charging and discharging power and energy change curve

### 3.2 误差平抑区间对储能配置的影响

本文考虑风功率预测误差的不确定性，基于该海上风电场的历史风速数据，先进行风速预测，再根据风功率-风速关系求得风功率预测值，与风功率实测值比较得到风功率预测误差，统计时间(10天)内的误差曲线如图 6 所示，根据预测结果计算得到对应的均方根误差百分比为 5.83%，针对该风功率预测误差曲线，配置合适功率/容量的储能系统，将风功率预测误差平抑至符合文献 [26] 要求的  $[-25 \text{ MW}, 25 \text{ MW}]$  范围内。

假设风功率预测误差服从均值为 0 的正态分布。取鲁棒机会约束置信度  $1 - \varepsilon = 0.95$ ，即将可靠性指标定为 95%。求解得到若要将风功率预测误差平抑至  $[-25 \text{ MW}, 25 \text{ MW}]$  内，应配置储能的额定功率为 9.42 MW，额定容量为 14.06 MWh，此时满足

平抑要求且对应的储能总投资成本最低。通过调整误差平抑区间，分析误差平抑区间对储能配置的影响，配置结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，随着误差平抑区间范围的增大，储能补偿误差的效果要求逐渐放宽，所需配置的储能逐渐减少，储能投资成本逐渐降低。故为风电场配置储能时，应控制合适的风功率预测误差平抑区间，达到误差补偿效果与经济性的平衡。

表 1 不同误差平抑区间对储能配置结果的影响

Table 1 Influence of different error smoothing intervals on the results of energy storage configuration

误差平抑区间/MW	储能功率/MW	储能容量/MWh	储能成本/万元
$[-15, 15]$	15.67	26.18	5 650.70
$[-25, 25]$	9.42	14.06	3 145.20
$[-35, 35]$	4.91	9.27	1 930.60

### 3.3 台风对储能配置的影响

相比于陆上风电场，海上风电场受台风、雷暴等天气的影响更大，复杂海洋气候条件导致的气象因素变化会影响到风功率预测的精度，最终影响到储能的配置结果。

下面以台风为例分析气象因素变化对储能配置的影响。仍采用该海上风电场统计时长为 10 天的实测数据，其中包含一个完整台风事件，台风影响期间风电场的风速时序曲线如图 7 所示，在台风产生影响的第 4 天达到最大风速，但并未超出风机的切出风速。在台风影响期间台风中心距风电场距离先减后增，单独求解每日风电场所需储能容量，结果如表 2 所示，可以看出，台风影响期间风电场所

需储能呈先增后减的趋势, 原因是为应对台风靠近带来的气象因素波动, 风电场需要配置更多的储能。值得注意的是, 台风影响期的第 10 天, 包括风速在内的各气象因素趋于稳定, 使得所需储能容量较不考虑台风时减少。考虑完整台风影响的风功率预测误差曲线如图 8 所示, 对应的均方根误差百分比为 9.28%。保持风功率预测误差平抑区间为[-25 MW, 25 MW]不变, 将是否考虑台风影响的储能配置结果进行对比, 如表 3 所示, 考虑台风影响后, 风功率预测误差绝对值落入无需平抑的[0 MW, 25 MW]区

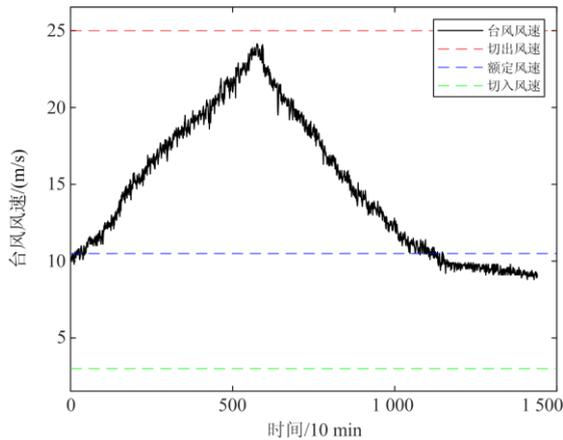


图 7 台风影响期间风电场风速时序曲线

Fig. 7 Wind speed time series curve of wind farm affected by typhoon

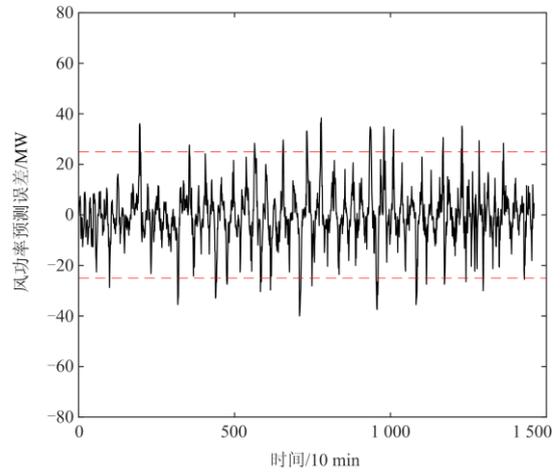


图 8 考虑台风影响的风功率预测误差曲线

Fig. 8 Wind power prediction error curve considering the influence of typhoon

间的点数减少, 落入需要平抑的[25 MW, 40 MW]区间点数增多, 且大于 40 MW 的较大值点数也增多, 总体误差水平上升, 这与均方根误差百分比的计算结果是一致的, 故台风使得预测精度下降。与不考虑台风的储能配置结果相比, 所需储能功率与容量均增加, 说明为了补偿台风等复杂海洋气候条件引起的更大的风功率预测误差, 需要更多的储能配置。

表 2 台风影响期间每日风电场所需储能配置

Table 2 Required energy storage configuration of the wind farm every day during the typhoon

时间	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Day 8	Day 9	Day 10
储能配置功率/MW	9.56	11.09	12.97	14.71	15.66	14.02	13.38	11.76	10.06	9.05
储能配置容量/MWh	14.82	16.21	17.34	18.63	19.29	18.17	17.94	16.75	15.61	12.94

表 3 有无考虑台风影响的储能配置结果对比

Table 3 Comparison of energy storage configuration results with or without typhoon

有无考虑台风	误差绝对值落入区间范围内点数/个			均方根误差 百分比/%	储能配置 功率/MW	储能配置 容量/MWh	储能配置 成本/万元
	[0 MW, 25 MW]	[25 MW, 40 MW]	>40 MW				
不考虑台风	1 364	65	11	5.83	9.42	14.06	3 145.20
考虑台风	1 335	87	18	9.28	15.66	19.29	4 616.10

### 3.4 鲁棒机会约束置信度对储能配置的影响

以上分析都基于鲁棒机会约束置信度  $1 - \varepsilon = 0.95$  展开, 下面讨论改变置信度对储能容量配置的影响, 风功率预测误差平抑区间仍为[-25 MW, 25 MW], 且不考虑台风等复杂天气对风速预测的影响, 对应的储能配置结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, 随着鲁棒机会约束置信度的减小(满足约束条件的概率要求放宽, 可靠性降低), 所需配置的储能

表 4 不同鲁棒机会约束置信度对储能配置的影响

Table 4 Impact of different robust chance constrained confidence levels on energy storage configuration

置信度 $1 - \varepsilon$	储能功率/ MW	储能容量/ MWh	储能成本/ 万元
0.99	12.23	16.95	3 887.80
0.95	9.42	14.06	3 145.20
0.90	8.17	13.48	2 920.70

功率、容量均减小, 储能总成本减少。这表明系统规划人员可以通过合理选取鲁棒机会约束置信度, 获得可靠性与经济性均良好的储能配置结果。

## 4 结论

本文考虑了台风对海上风电场储能容量配置的影响, 得到如下研究结论。

1) 本文分析了风功率预测误差平抑区间与鲁棒机会约束置信度对储能配置的影响, 误差平抑区间范围越小、置信度越大, 储能配置需求越高。在考虑台风影响后, 虽然储能配置成本上升, 但提高了海上风电场应对复杂海洋气候变化的能力。

2) 区别于其他论文将风功率预测误差简单限制在一定数值内, 本文通过储能充放电将其补偿至合适区间内, 并考虑到误差较大值带来的低经济性, 加入鲁棒机会约束置信度反映误差平抑的概率要求。

3) 本文为调整误差平抑区间及置信度以满足不同的经济性需求提供了一定参考, 为今后海上风电场大规模配置储能提供了理论依据。

未来将进一步研究多风场的储能容量配置, 以及分析不同海洋气候对储能配置结果的影响。

## 参考文献

- [1] 廖圣瑄, 陈可仁. 能源岛: 深远海域海上风电破局关键[J]. 能源, 2021(5): 46-49.  
LIAO Shengxuan, CHEN Keren. Energy island: the key to breaking offshore wind power in profound waters[J]. Energy, 2021(5): 46-49.
- [2] ALI S W, SADIQ M, TERRICHE Y, et al. Offshore wind farm-grid integration: a review on infrastructure, challenges, and grid solutions[J]. IEEE Access, 2021, 9: 102811-102827.
- [3] 唐巍, 郭雨桐, 闫姝, 等. 多场景海上风电场关键设备技术经济性分析[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 178-184, 216.  
TANG Wei, GUO Yutong, YAN Shu, et al. Techno-economic analysis of key equipment for offshore wind farms with multiple scenarios[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 178-184, 216.
- [4] DE SIQUEIRA LMS, et al. Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: a review[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35.
- [5] DONG W, LI S. Reliability sensitivity of wind power system considering correlation of forecast errors based on multivariate NSTPNT method[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 136-146.
- [6] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.
- [7] 兑潇玮, 朱桂萍, 刘艳章. 考虑预测误差的风电场储能配置优化方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 434-439.  
DUI Xiaowei, ZHU Guiping, LIU Yanzhang. Wind farm energy storage configuration optimization method considering forecast error[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 434-439.
- [8] JIA M, HUANG S, WANG Z, et al. Privacy-preserving distributed parameter estimation for probability distribution of wind power forecast error[J]. Renewable Energy, 2021, 163: 1318-1332.
- [9] 肖逸, 谢俊, 刘若平, 等. 计及风电功率预测误差的备用容量计算新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 72-79.  
XIAO Yi, XIE Jun, LIU Ruoping, et al. A new calculation method of reserve capacity considering wind power forecast errors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 72-79.
- [10] 南晓强, 李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 117-122.  
NAN Xiaoqiang, LI Qunzhan. Energy storage power and capacity allocation method considering the distribution of wind power forecast errors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 117-122.
- [11] TANG G, WU Y, LI C, et al. A novel wind speed interval prediction based on error prediction method[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 6806-6815.
- [12] 杨立滨, 曹阳, 魏鞞, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 45-52.  
YANG Libin, CAO Yang, WEI Wei, et al. Wind farm energy storage capacity allocation method considering wind power uncertainty and wind curtailment rate constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 45-52.
- [13] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 66-73.  
ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Cooperative optimal dispatching of sub-branched bars with consideration of the uncertainty of wind power

- output[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 66-73.
- [14] 韩杏宁, 黎嘉明, 文劲宇, 等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(9): 2120-2127.  
HAN Xingning, LI Jiaming, WEN Jinyu, et al. Robust optimal configuration method for energy storage in power systems with multiple wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(9): 2120-2127.
- [15] YU X, ZHANG W, DONG X, et al. Optimization of wind farm self-discipline interval and energy storage system configuration[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 79114-79123.
- [16] 高红均, 刘俊勇, 刘继春, 等. 基于坏场景集的含风电机组组合模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(10): 27-32.  
GAO Hongjun, LIU Junyong, LIU Jichun, et al. Combination model of wind turbine based on bad scene set[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(10): 27-32.
- [17] 桑丙玉, 姚良忠, 李明杨, 等. 基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(5): 86-94.  
SANG Bingyu, YAO Liangzhong, LI Mingyang, et al. DC grid energy storage configuration with large-scale wind power integration based on second-order cone programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 86-94.
- [18] DAI G, XU Z, CHEN Y F, et al. Analysis of the wind field characteristics induced by the 2019 Typhoon Bailu for the high-speed railway bridge crossing China's southeast bay[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 211.
- [19] 胡帅, 向月, 沈晓东, 等. 计及气象因素和风速空间相关性的风电功率预测模型[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(7): 28-36.  
HU Shuai, XIANG Yue, SHEN Xiaodong, et al. Wind power prediction model considering the spatial correlation of meteorological factors and wind speed[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(7): 28-36.
- [20] WANG L, KE S, HONG T, et al. Special field measurement results of an onshore wind farm connected to power grid of Taiwan power system subject to Typhoon Matmo[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(1): 158-166.
- [21] JAQUELINE D, MICHAEL B, PAUL J, et al. Climatological analysis of solar and wind energy in Germany using the Grosswetterlagen classification[J]. *Renewable Energy*, 2021, 164.
- [22] 盛四清, 金航, 刘长荣. 基于 VMD-WSGRU 的风电场发电功率中短期及短期预测[J/OL]. *电网技术*: 1-8[2021-09-13]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1198>.  
SHENG Siqing, JIN Hang, LIU Changrong. Short-term and short-term prediction of wind farm power generation based on VMD-WSGRU[J/OL]. *Power System Technology*: 1-8[2021-09-13]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1198>.
- [23] 韩冬冬. 风电场储能电池的容量优化配置[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.  
HAN Dongdong. Capacity optimization configuration of energy storage batteries in wind farms[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016.
- [24] 杨水丽, 李建林, 惠东, 等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置[J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1485-1491.  
YANG Shuili, LI Jianlin, HUI Dong, et al. Capacity optimization configuration of battery energy storage system for tracking planned output of wind farms[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1485-1491.
- [25] 李福东, 曾旭华, 魏梅芳, 等. 基于聚类分析和混合自适应进化算法的短期风电功率预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 151-158.  
LI Fudong, ZENG Xuhua, WEI Meifang, et al. Short-term wind power prediction based on cluster analysis and hybrid adaptive evolution algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 151-158.
- [26] 国家能源局. 风电场功率预测预报管理暂行办法[J]. *太阳能*, 2011(14): 6-7.  
National Energy Administration. Interim measures for the management of wind farm power forecasting[J]. *Solar Energy*, 2011(14): 6-7.

收稿日期: 2021-07-27; 修回日期: 2021-11-14

作者简介:

时 帅(1987—), 男, 博士, 讲师, 从事风电并网可靠性研究; E-mail: shishuai@shiep.edu.cn

吴慧娴(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 从事风电场储能容量配置研究。E-mail: 18800296068@163.com

(编辑 许 威)