

引用格式:杨帆,黄冬梅,时帅,等.基于可靠性评估的深远海风储接入系统优化调度[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):155-162.

Citation: YANG Fan, HUANG Dongmei, SHI Shuai, et al. Optimal dispatching of integration system in deep-sea offshore wind power storage based on reliability evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 155-162.

# 基于可靠性评估的深远海风储接入 系统优化调度

杨帆<sup>1</sup>, 黄冬梅<sup>2</sup>, 时帅<sup>1</sup>, 李媛媛<sup>1</sup>, 李东东<sup>1</sup>, Kwok Lun Lo<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 201306;

3.思克莱德大学电子与电气工程系, 格拉斯哥 苏格兰, G1 1XQ)

**摘要:** 伴随着更高的风速和更广阔的发展空间, 深远海海上风电展现出了巨大的发展潜力。为解决风速和风功率波动影响下深远海海上风电接入海上平台电力系统时面临的可靠性和优化问题, 首先研究海上不同高度层风速的相关性, 建立不同高度层风速和10 m高度层风速的关系; 随后提出一种风储优化调度方法, 考虑系统可靠性、储能限制等约束条件, 采用模型预测控制算法对调度模型进行求解; 最后应用Roy Billinton可靠性测试系统(Roy Billinton test system, RBTS)验证风电接入对系统可靠性的影响和所提风储调度模型的有效性。研究表明, 轮毂高度的风速修正对系统可靠性评估具有重要性意义, 合理利用储能并调度其储能的出力可以显著提升其可靠性, 为深远海海上风电可靠性评估研究提供有益补充。

**关键词:** 深远海海上风电; 可靠性评估; 风速; 海上平台; 模型预测控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.016 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2025)01-0155-08

## Optimal dispatching of integration system in deep-sea offshore wind power storage based on reliability evaluation

YANG Fan<sup>1</sup>, HUANG Dongmei<sup>2</sup>, SHI Shuai<sup>1</sup>, LI Yuanyuan<sup>1</sup>, LI Dongdong<sup>1</sup>, Kwok Lun Lo<sup>3</sup>

(1.College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2.College of Electrics and

Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 3.Department of Electronic and

Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XQ, United Kingdom)

**Abstract:** With higher wind speeds and broader development space, deep-sea offshore wind power demonstrates significant potential for growth. To address the reliability and optimization challenges associated with integrating deep-sea offshore wind power into marine platform power systems under the impact of wind speed and wind power fluctuations, initially, the correlation between wind speeds at different heights above sea level is investigated, establishing a relationship between wind speeds at various heights and those at 10 meters. Subsequently, an optimized wind power storage dispatching method is proposed. By considering the system reliability, energy storage limit, and other constraints, the model predictive control algorithm is used to solve the dispatching. Finally, the Roy Billinton test system (RBTS) system is utilized to verify the impact of wind power integration on system reliability and the effectiveness of the proposed wind power storage dispatching model. The results indicate that the wind speed correction at hub height is crucial for system reliability evaluation. The rational utilization and dispatching of energy storage can significantly enhance reliability, providing a valuable supplement to the reliability evaluation of deep-sea offshore wind power.

**Key words:** deep-sea offshore wind power; reliability evaluation; wind speed; offshore platform; model predictive control

收稿日期: 2024-04-02; 修回日期: 2024-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3101602)

通信作者: 时帅(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统运行可靠性、风电并网及碳排放税等研究; E-mail: ssglasgow@163.com

中国海上风电产业建设正逐步向深远海域迈进,海上风机的支撑结构也由固定式向漂浮式变化,山东省、浙江省和福建省都在推进深远海浮式风电产业园的规划建设<sup>[1]</sup>。在这样的形势下,可预计未来海上平台与邻近海上风电场将实现一体化。这一融合众多经济活动的商业模式具有高效利用海洋资源、共担风险与成本、减缓环境冲击以及提升社会经济价值等综合优势<sup>[2-3]</sup>。

深远海海上风电作为一种新兴的可再生能源形式,因其更高的风速和更广阔的发展空间展现出了巨大的发展潜力。相比近海和陆上风电,深远海海上风电不仅具有更高的能源密度,而且能有效避开陆地和近海的空间限制。然而,深远海海上风电的发展也面临着一系列挑战,一方面需考虑深远海与近海风况存在差异,需要对深远海风速进行分析;另一方面,风速和风功率具有波动性,接入海上平台电力系统会造成系统稳定性和可靠性方面的问题<sup>[4-5]</sup>。为此,对深远海海上风电接入海上平台电力系统的可靠性和优化调度进行深入研究,具有重要的理论意义和实际应用价值。

有效、准确地分析风电不确定性对系统运行可靠性的影响可为风电的合理利用提供坚实的理论依据<sup>[6]</sup>。含风电的电力系统可靠性评估方法主要分为蒙特卡罗模拟(Monte-Carlo simulation, MCS)法和解析法2种。MCS法基于随机数的生成和概率统计的原理,适用于复杂系统的可靠性评估<sup>[7-11]</sup>;解析法基于系统数学模型的分析,适用于对简单系统或特定场景进行可靠性评估。在提升可靠性计算精度上,以改进风速/风功率预测精度<sup>[7,12]</sup>、模型精度<sup>[12-14]</sup>和可靠性指标精度<sup>[15]</sup>为主;在方法的改进上,通过提高计算效率<sup>[8,16]</sup>与其他领域研究方法相结合来实现。但计算方法上的改进对系统的可靠性没有实质提升,因此,在电源侧采取加装储能装置、改进能源供应策略等措施是提高系统可靠性的重要途径。

研究海上风电可靠性评估时需考虑海上多气象因素的影响,其中风电机组故障率、故障修复时间受影响程度较大<sup>[17]</sup>。文献[18]提出了一种考虑风速和雷击因素影响的连续马尔科夫链蒙特卡罗法可靠性评估模型,以考虑海上恶劣天气的影响;文献[19]以正常和恶劣天气2种模态划分双天气,根据双天气的各自占比计算系统的可靠性指标;文献[20]对风暴发生过程进行了完全模拟,并根据实

时风速在风暴期间修正了输电线路的故障率;文献[21]则在分析2种天气状况的前提下,构建了一个包含特定故障率的马尔科夫模型。

关于储能参与风电接入电力系统可靠性的研究,国内外学者一般通过采用恰当的储能控制策略确定最佳容量,以此提升接入系统的可靠性<sup>[22]</sup>。文献[23]基于序贯蒙特卡罗模拟建立系统可靠性模型,分析储能系统接入含风电电力系统的可靠性影响;文献[24]考虑电动汽车充放电模式,建立风光储微网可靠性模型;文献[25]提出一种改进准序贯蒙特卡罗模拟法,通过建立储能平抑有功波动的指标进行储能容量优化;文献[26]兼顾失负荷概率和机组组合优化,提出合理利用储能提升系统可靠性的方法;文献[27]采用超立方抽样-蒙特卡洛法进行仿真,提高序贯蒙特卡洛法计算精度;文献[28]建立Copula模型解决高维风光储建模问题,精细化风光储模型对系统可靠性的影响;文献[29]利用模型预测控制-粒子群优化算法对储能功率进行滚动优化,降低储能成本的同时提升风电波动的平抑效果。

海上平台电力系统未来将以新能源为主体,构建低碳、安全、可靠、灵活及智能的新型电力系统概念和结构特征<sup>[30]</sup>。传统的海上平台电网供电方式单一且污染排放大,近年来,可再生能源技术的发展为海上平台的能源供应带来了新的可能,海上风电作为一种清洁能源已开始融入海上平台的能源供应体系中。在双碳背景下,海上新能源的接入是海上平台电网转型的必经之路。

针对以上问题,本文以深远海海上风电接入海上平台系统为研究背景,首先利用皮尔逊相关系数研究海上不同高度层风速的相关性,建立不同高度层风速和10 m风速的关系;然后提出一种风储优化调度方法,在满足系统可靠性、储能限制等约束条件且满足能量平衡约束的前提下,建立储能电池荷电状态(state of charge, SOC)波动最小的调度模型,基于滚动优化和反馈校正的方法,采用模型预测控制(model predictive control, MPC)算法对调度模型进行优化求解;最后采Roy Billinton可靠性测试系统(Roy Billinton test system, RBTS)验证风电接入对系统可靠性的影响,并验证所提模型的有效性。通过以上研究,本文旨在提高风储接入系统的可靠性和经济性,为深远海风电可靠性评估研究提供新的解决途径。

# 1 考虑深远海风速影响的海上风电接入系统可靠性评估

深远海风速的持续高稳定性为风力发电机组提供了有利条件,相对地,由于远海的可及性低,一旦机组发生故障,将造成系统停机时间过长、故障范围扩大等严重影响系统安全性的后果。因此,对深远海风力发电的可靠性进行评估具有重要意义。

## 1.1 轮毂高度风速模拟

随着海上风设备趋向大型化,机组的叶片变长、轮毂高度增加,造成风机实际输入风速与海平面实测风速存在差异,风速的这种垂直梯度差异对风电机组功率输出计算产生直接影响,在进行系统可靠性评估时,可能会导致评估结果出现偏差。故本文对海面上不同高度层风速进行模拟,通过对已知海面上不同高度层风速建立相关关系,推测风机轮毂高度层风速,可在一定程度上提升输入风速的准确性。

风速模型采用实测海面上 10 m 层高度数据,用皮尔逊相关系数建立不同高度风速间的相关关系并计算其相关性系数。计算表达式如下:

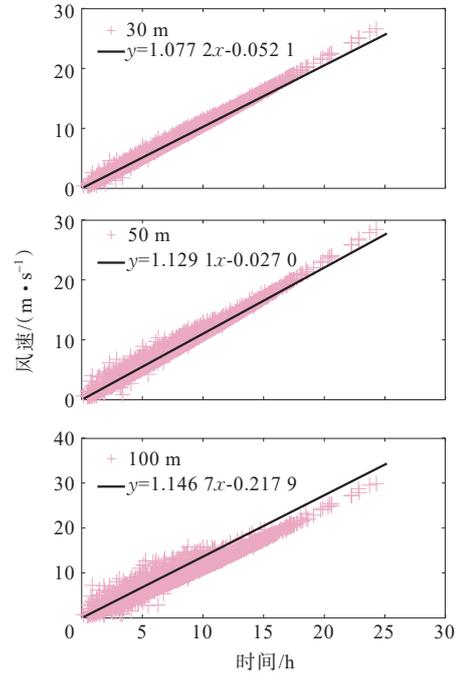
$$\rho_{v_0, v_i} = \frac{\text{cov}(v_0, v_i)}{\sigma_{v_0} \sigma_{v_i}} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{v_0, v_i}$  为相关性系数;  $v_i$  为海面上第  $i$  层高度层风速;  $v_0$  为海面上 10 m 高度层风速;  $\sigma_{v_0}$ 、 $\sigma_{v_i}$  分别为  $v_i$ 、 $v_0$  的标准差;  $\text{cov}(v_0, v_i)$  为  $v_i$ 、 $v_0$  的协方差。

不同高度层与 10 m 高度层的相关性系数统计结果如表 1 所示。根据当前海上风机的数据,选取轮毂高度为 170 m,用表 1 中表达式进行风速间的模拟,结果显示,30、50、100 m 高度层风速均与 10 m 高度层风速呈现正相关关系。具体而言,30 m 高度层风速表现出最高的相关性,其相关系数达到了 0.998 2;而 50、100 m 高度层风速也展现出较高的相关性,相关系数分别为 0.993 3、0.972 7。随着高度的增加,相关系数在一定程度上减小,考虑误差范围的相对较小,在此不予深入探讨。30、50、100 m 高度层风速与 10 m 高度层风速的拟合曲线如图 1 所示。

**表 1** 不同高度层风速拟合表达式及相关性系数  
**Table 1** Wind speed fitting expressions and correlation coefficients at different heights

高度/m	拟合表达式	相关性系数
30	$y=1.077\ 2x-0.052\ 1$	0.998 2
50	$y=1.129\ 1x-0.027\ 0$	0.993 3
100	$y=1.146\ 7x-0.217\ 9$	0.972 7



**图 1** 不同高度层风速拟合结果

**Figure 1** Fitting results of wind speed at different heights

观察表 1 可以发现,不同高度层与 10 m 高度层风速均存在一定相关性,可以通过研究其之间的相关关系,利用 10 m 高度层风速反演至轮毂高度风速。研究结果表明,风速随高度的分布呈对数规律,同时受大气稳定性和下垫面粗糙度的影响。海面上风速<sup>[31]</sup>可以表示为

$$v_x = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{h_x}{z_0}\right) \quad (2)$$

$$v_{10} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{10}{z_0}\right) \quad (3)$$

两式相除得到:

$$v_x = \frac{1}{\kappa_z} v_{10} \quad (4)$$

$$\kappa_z = \frac{\ln(10/z_0)}{\ln(h_x/z_0)} \quad (5)$$

式中,  $v_x$  为风速;  $h_x$  为任意高度;  $u_*$  为摩擦速度;  $\kappa$  为 von Karman 常数,取为 0.35;  $z_0$  为粗糙度;  $\kappa_z$  为风速在不同高度层间的换算系数。

海面粗糙度和风速间的动态关系<sup>[32]</sup>为

$$z_0 = 10 \exp(-20\sqrt{5} \kappa v_{10}^{-1/4}) \quad (6)$$

综上,联立式(5)、(6)即可列出不同高度层和 10 m 高度层风速的关系表达式:

$$v_x = \left[ \frac{1}{7\sqrt{5} v_{10}^{-1/4}} \ln(h_x/10) + 1 \right] v_{10} \quad (7)$$

## 1.2 海上风电接入系统可靠性建模

本文采用风力发电机(wind turbine generator, WTG)三状态模型,如图2所示, $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为系统故障、降额状态的故障率, $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 分别为系统故障、降额状态的修复率。正常运行状态1:WTG正常工作,其所发功率由风速决定,输出功率计算表达式与单状态模型相同;降额运行状态2:当WTG状态异常影响正常运转时,通过切除负荷保护WTG,输出功率为正常运行状态的80%;故障停运状态3:系统故障导致WTG出现停机状态,WTG输出功率为0。

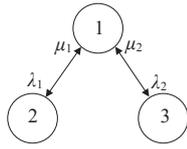


图2 WTG三状态模型

Figure 2 Three-state model of WTG

风电转换模型采用标准功率特性曲线,如图3所示,在标准空气密度条件下,该曲线展示了风力发电机组输出功率与风速的关联性。WTG功率输出曲线可用如下函数表示:

$$P_z = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_i < v_{ci} \\ (\alpha + \beta v_i + \gamma v_i^2) p_r, & v_{ci} \leq v_i < v_r \\ p_r, & v_r \leq v_i < v_{co} \\ 0, & v_i \geq v_{co} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_z$ 为WTG的实际出力; $p_r$ 为WTG的额定功率参数; $v_i$ 为风电场实时风速; $v_{ci}$ 为切入风速; $v_{co}$ 为切出风速; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为给定系数。

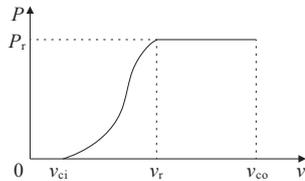


图3 风力发电机组功率输出曲线

Figure 3 Wind turbine power output curve

## 2 深远海风储供能优化调度方法

在满足各相关能量平衡的约束条件下,本文以储能电池SOC波动最小建立调度模型,基于滚动优化和反馈校正的思想,采用MPC算法对调度模型进行优化求解。

### 2.1 预测模型

本文以风储接入系统为研究算例,主要由燃

气轮机、风力发电机、蓄电池和负荷构成,根据系统每时段的燃气轮机出力、储能系统出力、储能SOC方程以及风电机组出力构成的向量 $x(k) = [P_{GT}(k), P_{ES}(k), S_B(k), P_{WT}(k)]^T$ 为状态变量;以燃气轮机、风电和储能出力增量构成的向量 $u(k) = [\Delta P_{GT}(k), \Delta P_{WT}(k), \Delta P_{ES}(k)]^T$ 为控制变量;以负荷、风电机组的超短期预测功率增量构成的向量 $r(k) = [\Delta P_{Load}(k), \Delta P_{WT}(k)]^T$ 为扰动输入;以储能SOC构成的向量 $y(k) = [S_B(k)]$ 为输出变量,则可建立下列状态空间模型:

$$x(k + \Delta t) = \begin{bmatrix} P_{GT}(k + \Delta t) \\ P_{ES}(k + \Delta t) \\ S_B(k + \Delta t) \\ P_{WT}(k + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\Delta t}{E_{bat}} & 1 - \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{GT}(k) \\ P_{ES}(k) \\ S_B(k) \\ P_{WT}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{E_{bat}} \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{GT}(k) \\ P_{WT}(k) \\ P_{ES}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{Load}(k) \\ \Delta P_{WT}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$y(k) = [S_B(k)] = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} P_{GT}(k) & P_{ES}(k) & S_B(k) & P_{WT}(k) \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

基于风电机组的超短期预测功率预测数据,对状态空间模型进行反复迭代,直到计算出 $k$ 时刻向前预测 $p$ 步的蓄电池SOC在预测时长 $p\Delta t$ 的预估输出值构成的向量,表述为

$$Y_f = [S_B^f(k + \Delta t), \dots, S_B^f(k + p\Delta t)]^T \quad (11)$$

### 2.2 目标函数

首先,设置蓄电池SOC的期望输出。考虑系统的约束条件,以系统经济、可靠性最优为目标函数进行系统优化调度,以此调度中蓄电池SOC的出力方案作为期望输出(本文重点讨论MPC滚动优化对系统可靠性的提升)。滚动优化的控制目标是使蓄电池SOC的预测输出跟踪优化调度中的期望输出,因此,取 $k$ 时刻向前预测 $p$ 步的蓄电池SOC的日前输出值作为参考向量,记为

$$R_{da} = [S_B^{ref}(k + \Delta t), \dots, S_B^{ref}(k + p\Delta t)]^T \quad (12)$$

接着,以蓄电池SOC的预测输出与期望输出的误差最小建立优化目标函数,使储能跟踪调度计划运行。具体目标函数为

$$\begin{cases} \min J = (R_{da} - Y_f)^T W_{err} (R_{da} - Y_f) + U^T Q_u U \\ \text{s.t.} \begin{cases} P_t^{\min} \leq P_t \leq P_t^{\max} \\ E_c S_{OC, \min} \leq E(t) \leq E_c S_{OC, \max} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{d, \max}(t) \\ 0 \leq P_{ch}(t) \leq P_{c, \max}(t) \\ U_{bat} \leq N_{bat} \\ L_{OLP} \leq L_{OLP, \max} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $W_{err} = \text{diag}[W_b^k, \dots, W_b^{k+p\Delta t}]$  为风电输出功率、SOC 预测输出和期望输出的误差权矩阵;  $Q_u$  为控制量的权矩阵;  $E(t)$  为蓄电池  $t$  时段的总能量;  $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$  分别为蓄电池  $t$  时段的充、放电功率;  $E_c$  为蓄电池的满容量;  $S_{OC, \min}$ 、 $S_{OC, \max}$  分别为蓄电池的最小、最大充电状态值, 取值范围均为  $(0, 1]$ ;  $P_{d, \max}(t)$ 、 $P_{c, \max}(t)$  分别为蓄电池  $t$  时段放电、充电最大值, 其值均与  $t-1$  时段的电池储存能量有关;  $U_{bat}$  为蓄电池一周期的充放电转化次数;  $N_{bat}$  为蓄电池充放电次数限值;  $L_{OLP, \max}$  为系统最大的电力不足概率(loss of load probability, LOLP)。

### 2.3 反馈校正

在系统实际运行过程中, 为确保储能系统经过充放电功率调节后的输出功率与预定的目标功率相匹配, 引入反馈环节, 通过实时测量值对每一采样时刻的预测模型输出进行必要的修正。经过修正后的预测输出随即被用作下一时刻的初始参考值, 再结合实际输出值进行新一轮的修正, 并持续进行基于实际输出值的滚动优化。这一过程循环往复, 构成了闭环优化系统, 得到更为精准的预测输出值, 从而确保储能系统的输出功率能够精准达到预期目标。

$$x(k) = x_{real}(k) \quad (14)$$

式中,  $x(k)$ 、 $x_{real}(k)$  分别为每次采样时刻的预测模型输出和实际测量值。

## 3 算例分析

### 3.1 海上风速模拟结果

根据式(7)对轮毂高度进行修正, 如图 4 所示, 可知海平面高度与风速之间呈现正相关的趋势, 即随着高度的增加, 风速也相应地上升。这种趋势的存在为风力发电、建筑防风设计等领域的研究提供了参考; 同时, 在进行相关研究时, 凸显了充分考虑高度因素对风速影响的重要性, 以便更加准确地预测和评估相关问题。根据 WTG 三状态模型, 采用马尔科夫过程模拟一年内 WTG 输出状态, 数值为 1

表示系统正常运行, 0.8 表示系统降额运行, 0 表示系统停运, 如图 5 所示。

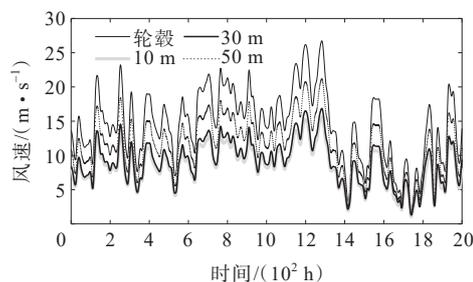


图 4 不同高度层风速对比

Figure 4 Comparison of wind speeds at different heights

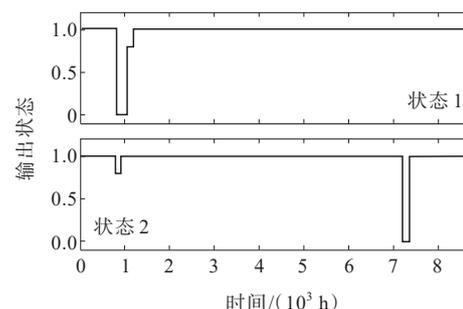


图 5 一年中 WTG 输出状态

Figure 5 Outputs status of WTG within a year

为了研究海上不同高度层风速对系统可靠性的影响, 设置 2 种场景进行分析, 并计算每种场景下使用不同高度层风速计算出的可靠性指标。本文选用的可靠性指标有 LOLP、电力不足频率(loss of load frequency, LOLF)和电量不足期望值(expected energy not supply, EENS)。

场景 0 不考虑海上风电的接入, 即系统的电源全部来自传统燃气轮机;

场景 1 考虑海上风电接入系统, 由燃气轮机和风电共同向系统供电。

场景 0、1 下的可靠性评估指标如表 2 所示。

表 2 场景 0、1 下的可靠性评估指标

Table 2 Reliability evaluation index under scenarios 0 and 1

场景	高度/m	$L_{OLP}$	$L_{OLF}/$ (次数·a <sup>-1</sup> )	$E_{ENS}/$ (MW·h·a <sup>-1</sup> )
0	10	0.425 0	0.303 6	11.484 0
	30	0.425 3	0.295 2	11.450 1
	50	0.424 5	0.302 8	11.481 7
	170	0.424 9	0.301 9	11.457 4
1	10	0.245 7	0.286 1	5.964 0
	30	0.244 8	0.278 0	5.929 0
	50	0.245 9	0.278 7	5.989 9
	170	0.243 4	0.265 7	5.906 6

总体来说,采用轮毂高度处的风速计算出的系统可靠性最高。原因是轮毂高度处的风速较大,有利于风机输出功率的提升,从而提高整个系统的可靠性。从不同场景的角度来观察,在场景1中,当系统接入风电后,由各高度处的风速得出的系统可靠性水平均显著提升,LOLP出现大幅度下降,同时EENS下降一半。这说明风电的接入对于提升整个系统的可靠性水平具有明显的积极作用。

### 3.2 风储优化调度结果

在RBTS测试系统中配置储能系统,进行风储优化调度,用优化后的风储联合输出作为系统供电,计算系统可靠性参数。风电机组总装机容量为40 MW,燃气轮机机组容量为800 MW,储能(energy storage, ES)系统选用蓄电池储能,总容量为60 MW·h,电池SOC取为0.5,其最大、最小值分别为0.9、0.2。

如图6所示,采用滚动优化策略进行分布电源的调度,一定程度上缓解了可再生能源的功率波动;如图7所示,通过滚动优化调度,利用MPC算法使得风电储能系统的功率输出更加平滑,优化了风储系统的工作状态,使其具有更好的输出功率表现,有效提升了风储系统的稳定性,并有利于延缓储能系统寿命的衰减。

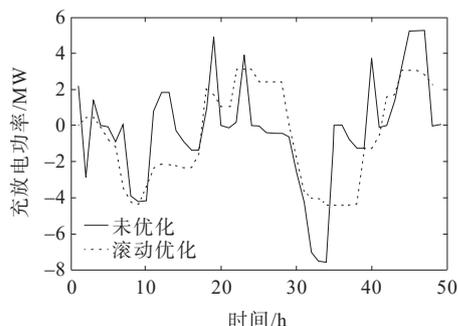


图6 储能调度结果

Figure 6 Dispatching results of energy storage

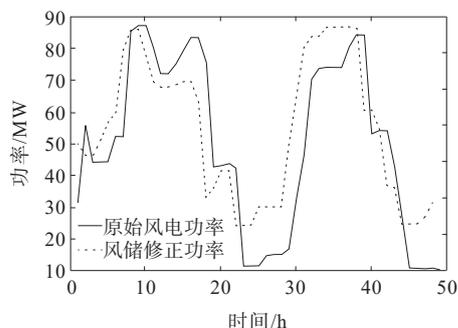


图7 风储调度结果

Figure 7 Dispatching results of wind power storage

为了研究风储优化调度对系统可靠性的影响,在场景0、1的基础上设置场景2、3进行分析,并计算每种场景下使用不同高度层风速计算出的可靠性指标。

场景2 不考虑优化调度的风储接入,即采用普通储能接入电力系统方法,在风电功率输出不足时,电力缺额由储能系统发电供给系统;风电功率输出充足时,富余电力由储能系统进行存储;

场景3 采用优化调度后的风储系统联合输出接入,即将风储优化调度结果中的风储联合输出功率作为系统供电。

在储能接入系统后,相比场景0、1,场景2、3中系统可靠性指标更低,体现了储能装置对系统可靠性水平具有较明显的提升效果。如表3所示,采用模型预测控制的风储优化调度后,场景3对比场景2,系统可靠性指标的数值进一步下降,验证了本文所提方法对系统可靠性提升的有效性。

表3 场景2、3下的可靠性评估指标

Table 3 Reliability evaluation index in scenarios 2 and 3

场景	高度/m	$L_{OLP}$	$L_{OLF}/$ (次数·a <sup>-1</sup> )	$E_{ENS}/$ (MW·h·a <sup>-1</sup> )
0	10	0.237 6	0.251 9	5.969 3
	30	0.231 5	0.247 7	5.855 4
	50	0.233 9	0.249 4	5.926 7
	170	0.211 8	0.255 1	5.774 1
1	10	0.203 1	0.225 6	5.436 1
	30	0.217 9	0.230 4	5.338 7
	50	0.219 0	0.244 7	5.674 4
	170	0.224 5	0.231 4	5.521 3

## 4 结语

由于近海风电项目发展受限,未来趋势将向深远海转移。深海独特条件(如大风速、高浪深)为风电开发提供了巨大潜力。然而,风电接入海上平台电网也会带来系统稳定与可靠性问题,因此评估其可靠性并提出解决方案至关重要。在接入海上平台电力系统时,本文聚焦于深远海海上风电如何应对风速与风功率波动带来的可靠性与优化难题,从分析海上不同高度层风速间的关联性着手,构建了从各高度层风速到10 m层基准风速的计算模型,分析风电接入对整个系统稳定性的影响;提出了一种协同优化调度策略,并综合考量多重因素,采用MPC算法对目标进行求解。未来需考虑海上平台

电网作为综合能源系统的情况,对平台电能、燃气能等进行综合考虑,实现系统综合能源方面的优化控制。希望本文研究成果能够为中国深远海风电的建设发展提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等.大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J].电力系统自动化,2021,45(21):33-47.  
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(21):33-47.
- [2] LEGORBURU I,JOHNSON K R,KERR S A.Multi-use maritime platforms-North Sea oil and offshore wind: opportunity and risk[J]. Ocean & Coastal Management, 2018,160:75-85.
- [3] 宋延涛,范雪峰,吴庆范,等.基于MMC的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J].高压电器,2023,59(12):63-74.  
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12):63-74.
- [4] 杜伟,罗先觉,王秀丽,等.基于全系统可靠性评估方法的海上油田群电网可靠性评估[J].电力系统自动化,2020,44(12):108-116.  
DU Wei, LUO Xianjue, WANG Xiuli, et al. Reliability evaluation on power system of offshore oilfield group based on system-wide reliability evaluation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12):108-116.
- [5] 史明明,刘瑞煌,张宸宇,等.考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J].电力工程技术,2024,43(4):77-87.  
SHI Mingming, LIU Ruihuang, ZHANG Chenyu, et al. Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology,2024,43(4):77-87.
- [6] 易文飞,朱卫平,郑明忠.计及数据中心和风电不确定性的微电网经济调度[J].中国电力,2024,57(2):19-26.  
YI Wenfei,ZHU Weiping,ZHENG Mingzhong.Economic dispatch of microgrid considering data center and wind power uncertainty[J].Electric Power,2024,57(2):19-26.
- [7] DING J, XIE K, HU B, et al. Mixed aleatory-epistemic uncertainty modeling of wind power forecast errors in operation reliability evaluation of power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022,10(5):1174-1183.
- [8] AMARAL T S, GOMES S, BORGES C L T, et al. Reliability evaluation of bulk power systems with wind generation using small signal stability analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy System,2021,129:106840.
- [9] 张军达,卢姬,常俊晓,等.考虑可靠性成本的配电网多阶段扩展规划方法[J].电测与仪表,2023,60(11):113-122.  
ZHANG Junda, LU Ji, CHANG Junxiao, et al. Multistage expansion planning method for distribution network considering reliability cost[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(11):113-122.
- [10] 赵宇,李谦,张云晓,等.含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J].智慧电力,2024,52(8):25-32+49.  
ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy[J]. Smart Power,2024,52(8):25-32+49.
- [11] 丁长新,王翔,赵波,等.基于动态组网的园区微电网群运行优化[J].电网与清洁能源,2024,40(5):1-9.  
DING Changxin, WANG Xiang, ZHAO Bo, et al. Operation optimization for the industrial park microgrid cluster based on dynamic networking[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5):1-9.
- [12] NGUYEN N, MITRA J. Reliability of power system with high wind penetration under frequency stability constraint[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1):985-994.
- [13] DING Y, SINGH C, GOEL L, et al. Short-term and medium-term reliability evaluation for power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3):896-906.
- [14] 孙瑞娟, Gayan ABEYNAYAKE, 穆清, 等. 基于通用生成函数的海上风电集电系统可靠性与经济性评估[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5):159-173.  
SUN Ruijuan, Gayan ABEYNAYAKE, MU Qing, et al. Reliability and economic evaluation of offshore wind power collection system based on universal generating function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5):159-173.
- [15] WANG X, HUANG R, ZHAO J, et al. Research on evaluation index system for reliability of power system including offshore wind farm[C]//4th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), Beijing, China, 2022.
- [16] CHEN F, LI F, FENG W, et al. Reliability assessment method of composite power system with wind farms and its application in capacity credit evaluation of wind farms [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 166:73-82.
- [17] SAHIN A D, SEN Z. First-order Markov-chain approach to wind speed modelling[J]. Journal of Wind Engineering

- and Industrial Aerodynamics,2001,89(3-4): 263-269.
- [18] HE L,ZHOU M,GUO F,et al,et al.Comparative study on reliability of wind farm collector systems[C]// International Conference on Renewable Power Generation, Beijing,China,2015.
- [19] CHAO H,HU B,XIE K,et al.A sequential MCMC model for reliability evaluation of offshore wind farms considering severe weather conditions[J]. IEEE Access, 2019,7:132552-132562.
- [20] 鲁宗相,程丽娟,乔颖,等.计及风资源约束的双天气模式海上风电系统可靠性评估[J].电网技术,2015,39(12): 3536-3542.
- LU Zongxiang, CHENG Lijuan, QIAO Ying, et al. Offshore wind power system reliability evaluation considering wind resource constraints and double weather patterns[J]. Power System Technology, 2015, 39 (12):3536-3542.
- [21] LI G, ZHANG P, LUH P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the Northeast U. S. under wind storms[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29 (2):889-898.
- [22] 鲁鹏,田浩,武伟鸣,等.需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):42-51.
- LU Peng, TIAN Hao, WU Weiming, et al. Optimal capacity of a wind-solar-thermo-storage-bundled power transmission system considering battery life[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 42-51.
- [23] 袁明飞,赵凤展,王树田,等.基于蒙特卡洛模拟的含风电-储能发电系统可靠性评估[J].电器与能效管理技术,2020(5):28-34.
- YUAN Mingfei,ZHAO Fengzhan,WANG Shutian,et al. Reliability evaluation of wind-storage power generation system based on Monte Carlo simulation[J].Electrical & Energy Management Technology,2020(5):28-34.
- [24] 徐鹏程.含电动汽车有序充放电和风/光/储微网的配电网可靠性评估[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2021.
- XU Pengcheng. Reliability evaluation of distribution network including orderly charging and discharging of electric vehicles and wind/solar/storage microgrid[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology,2021.
- [25] 涂炼,刘涤尘,廖清芬,等.计及储能容量优化的含风光储配电网可靠性评估[J].电力自动化设备,2015,35(12): 40-46.
- TU Lian, LIU Deduan, LIAO Qingfen, et al. Reliability evaluation considering storage capacity optimization for distribution system with wind-PV-storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):40-46.
- [26] 吴亚茹.基于可靠性评估的储能参与高比例风电并网优化运行研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.
- WU Yaru. Research on optimal of energy storage participating in high proportional of wind power integration based on reliability evaluation[D].Changsha: Changsha University of Science &Technology,2019.
- [27] 杨雨薇.含风储并网的电力系统可靠性评估方法研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- YANG Yuwei. Research on the reliability evaluation method of power system containing wind storage and grid connection[D].Beijing: North China Electric Power University,2021.
- [28] 高小童,秦志龙,高新宇.含海上风电-光伏-储能的多能源发输电系统可靠性评估[J].发电技术,2022,43(4): 626-635.
- GAO Xiaotong, QIN Zhilong, GAO Xinyu. Reliability evaluation of multi-energy generation and transmission system with offshore wind power-photovoltaic-energy storage[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 626-635.
- [29] 严潇,程杉,左先旺,等.基于目标优选和模型预测控制的风储优化策略[J].电力科学与技术学报,2023,38(1): 1-10.
- YAN Xiao,CHENG Shan,ZUO Xianwang,et al.Optimally selected objective and model predictive control based optimal strategy of wind power with energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023, 38(1):1-10.
- [30] 魏澈,苏开元,邱银锋,等.海上油田群新型电力系统的构建路径与关键技术[J].电网技术,2024,48(8):3287-3298.
- WEI Che, SU Kaiyuan, QIU Yinfeng, et al. Construction path and key technologies of new-type offshore oilfield power systems[J].Power System Technology,2024,48(8): 3287-3298.
- [31] 陈永利,赵永平,张必成,等.海上不同高度风速换算关系的研究[J].海洋科学,1989(3):27-31.
- CHEN Yongli,ZHAO Yongping,ZHANG Bicheng,et al. The study of the relationship of wind welocity at different heights over the sea[J]. Marine Sciences, 1989 (3):27-31.
- [32] 赖鑫,王德立,江崑,等.南中国海10 m风和海面动态粗糙度特征研究[J].气象,2016,42(12):1531-1539.
- LAI Xin, WANG Deli, JIANG Yin, et al. Study on the characteristics of 10 m wind and sea surface dynamic roughness length in the South China sea[J].Meteorological Monthly,2016,42(12):1531-1539.