

引用格式:黄冬梅,牟宗凯,时帅,等.考虑复杂海洋状况下的深远海风电场并网系统可靠性评估[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):174-183.

Citation: HUANG Dongmei, MU Zongkai, SHI Shuai, et al. Reliability assessment of grid-connected systems in deep-sea offshore wind farms under complex oceanic conditions[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 174-183.

考虑复杂海洋状况下的深远海风电场 并网系统可靠性评估

黄冬梅¹, 牟宗凯¹, 时帅¹, 胡安铎², 杜艳玲³, 费严诚⁴

(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;4.上海东海海洋工程勘察设计院测绘勘察部,上海 201799)

摘要:与现有海上风电场相比,由于海洋和气候条件的不同,深远海海上风电场对电力系统运行可靠性的影响更为复杂。为了分析大型深远海海上风电机组的运行可靠性,提出考虑中尺度涡和热带气旋影响的可靠性评估模型,用于评价海洋关键因素与系统可靠性之间的内在机制。利用改进的罗伊·比林顿测试系统(Roy Billinton test system, RBTS)分析了东海中尺度涡、热带气旋及相应的海气耦合作用对系统可靠性的影响。模拟结果表明,中尺度涡和热带气旋对风电并网系统可靠性影响显著,且呈季节性趋势。此外,在仿真算例中应用了储能系统,以提高可靠性水平,减少负面影响。

关键词:海上风电;电力系统;中尺度涡;热带气旋;海-气相互作用;可靠性评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.018 **中图分类号:** TM732 **文章编号:** 1673-9140(2024)06-0174-10

Reliability assessment of grid-connected systems in deep-sea offshore wind farms under complex oceanic conditions

HUANG Dongmei¹, MU Zongkai¹, SHI Shuai¹, HU Anduo², DU Yanling³, FEI Yancheng⁴

(1.College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2.College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3.College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4.Surveying and Mapping Department, Shanghai Donghai Marine Engineering Survey Design & Research Institute, Shanghai 201799, China)

Abstract: Compared with that of the existing offshore wind farms, the impact of deep-sea offshore wind farms on the operation reliability of power systems is more complex due to varied oceanic and climatic conditions. In order to analyze the operation reliability of large-scale deep-sea offshore wind power integration, a reliability assessment model considering the effects of mesoscale eddies and tropical cyclones is proposed, which is used to evaluate the internal mechanism between critical marine factors and system reliability. The effects of mesoscale eddies, tropical cyclones, and corresponding air-sea interactions in the East China Sea on system reliability are analyzed by using the modified Roy Billinton test system (RBTS). The simulation results show that the mesoscale eddies and tropical cyclones have a significant influence on the reliability of the wind power integration system, and the influence shows a seasonal trend. Furthermore, an energy storage system is applied to the simulation case to improve the reliability level and reduce the negative impacts.

Key words: offshore wind power; power system; mesoscale eddy; tropical cyclone; air-sea interaction; reliability assessment

近年来,海岸附近的风资源日益饱和,海上风电场逐步向深远海域发展。由于深远海海上风电

场具有影响因素繁多、维修可及性差等特征,开展考虑复杂海洋大气状况(如中尺度涡、热带气旋等)

收稿日期:2023-03-06;修回日期:2024-09-10

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等研究;E-mail: ssglasgow@163.com

的深远海风电场并网系统可靠性评估,具有很高的研究价值。

目前,并网系统的可靠性评估研究多集中于分析方法创新和模型改进2个方面。文献[1]采用量子遗传算法对功率进行分段,计算风电输出的概率预测区间,提出了一种新的风力发电概率区间预测模型和可靠性评估方法。文献[2]提出了元件连锁停运模型,有效模拟了多重故障对大电网可靠性的影响。文献[3]将改进贝叶斯网络与时序分析方法相结合,提出一种基于改进贝叶斯网络的风电机组动态可靠性评估方法。现有的可靠性评估模型主要针对海上风电场并网系统的状态分析和可靠性指标改进等问题,少有针对深远海域存在的诸多影响因素的分析。文献[4]考虑了在台风影响下,风电并网系统的可靠性变化趋势和状态检修的策略优化。文献[5]提出了多失效模式模型,基于该模式计算并网系统可靠性会更加安全准确。文献[6]考虑了风资源约束和恶劣天气对风电并网系统可靠性的影响,进行了海上风电系统全环节可靠性评估。文献[7]根据不同天气因素的影响程度,建立了适用于评估部件失效概率和预安排维修的天气条件模型,并提出了考虑气象条件部件失效的模型。文献[8]分析了影响风力机故障率的主要因素,建立了风速和闪电对风力机故障率影响的时变解析模型。上述文献评估了气象因素对风电并网系统的影响,但深远海域环境复杂,现有模型未对深远海域中常见的中尺度涡、热带气旋以及两者之间的海气耦合作用对系统可靠性造成的影响进行量化分析^[9-10]。

中尺度涡和热带气旋带来的海面温度异常(sea surface temperature anomalies, SSTA)易引发风的空间变化。在中尺度涡的影响下,相应海域的海面温度(sea surface temperature, SST)和风速异常(wind speed anomalies, WSA)呈正相关^[11-12],风速的变化会直接影响风电场出力^[13-14]。此外,中国东海区域夏季热带气旋频发,热带气旋是相应海域中尺度涡形成和变化的重要影响因素,而中尺度涡对台风和热带气旋的路径和强度具有反作用,海-气相互作用的耦合机制,会进一步影响深远海域的海表面风速^[15]。上述文献均从海洋与大气因素出发,主要研究深远海域海况变化趋势,并未将复杂海洋因素与海上风电场并网系统的可靠性评估进行结合,在含深远海海上风电场的并网系统中,可靠性评估模型有待改善。

针对上述问题,本文建立了考虑中尺度涡、热带气旋和海气耦合作用的海上风电场可靠性模型。对复杂海洋因素影响下的风速变动进行量化分析,使风速参数化模型能更好地反映特定海域的实际情况,采用在估计复杂系统可靠性指标方面具有显著优势的序贯蒙特卡罗法^[16-18],讨论风电渗透率不同时,复杂海洋状况对风电并网系统可靠性的影响。本文还配置了储能模型以提高系统可靠性水平,算例结果验证了所提出模型的合理性。

1 中尺度涡影响风速机理

1.1 东海中尺度涡变化规律

东海风力资源丰富,发展潜力巨大,许多沿海城市都有建设大型深远海风电场的长期规划。中尺度涡在海洋中普遍存在,表现形式为不规则的三维螺旋结构,影响深度大于1 000 m,对能量传递和物质输送起至关重要的作用。

本文选取法国 Aviso 网站提供的海表面高度异常(sea level anomaly, SLA)数据,时间跨度为1999—2019年,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,去除水深小于100 m的涡旋数据。温盐剖面数据来自Argo网站历史资料。每一时刻SLA场中的某涡旋 E_1 和下一时刻SLA场中的某涡旋 E_2 的无量纲距离计算如下:

$$D_{E_1, E_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_{KE}}{E_{KE_0}}\right)^2} \quad (1)$$

式中, Δx 、 ΔR 、 $\Delta \epsilon$ 、 ΔE_{KE} 为涡旋 E_1 、 E_2 之间的距离、半径变量、涡度变量和海表面涡旋动能变量(eddy kinetic energy, EKE); x_0 、 R_0 、 ϵ_0 、 E_{KE_0} 分别为两涡旋之间距离、半径、涡度和涡旋动能的标准值。在满足中尺度涡移动速度范围内,选择振幅大于3.5 m,涡旋直径大于30 km,生命周期大于30 d, D_{E_1, E_2} 最小的中尺度涡作为独立的涡旋数据。通过对1999—2019年全球中尺度涡的统计数据进行分析发现:东海中出现了2 427个中尺度涡,最大生命周期为220 d,大多数涡旋的生命周期为2~3个月。

在东海海域中,中尺度涡的数量及其影响机制存在季节性变化。夏季和冬季是中尺度涡最活跃的季节,而在其他季节,涡旋的数量迅速减少。利用跟踪数据集对中尺度涡进行深入分析^[19],结果表明:东海海域中尺度涡造成的WSA空间模式与夏冬两季SSTA的变化格局一致,总体呈正相关性。

涡旋在夏季的表现形式以顺时针旋转的反气旋涡为主,涡旋中心为暖涡,带动相关海域海温上升,海面风速加快;冬季以逆时针旋转的气旋涡为主,涡旋中心为冷涡,引起相关海域海温下降,海面风速降低。海表面温度异常与涡旋表面风速的耦合系数受海面面积和涡旋的空间分布差异影响。

1.2 中尺度涡耦合系数

中尺度涡引起的风速扰动与海温扰动幅度呈现明显的季节特性,在冬季,SSTA和WSA的变化幅度均高于夏季^[20]。因中尺度涡的半径远大于海上风电场半径,且中尺度涡范围内不同海域位置的SST差别很小,故本文不考虑海上风电场的位置因素。根据运行经验,本文将海平面以下0~80 m的位温变化平均值 T_{SSTA} 和高于海面100 m的风速变化平均值 V_{WSA} 作为SSTA和WSA数据,涡旋耦合系数 s 表达式为

$$s = \frac{V_{WSA}}{T_{SSTA}} \quad (2)$$

在东海海域,夏季反气旋(气旋)的耦合系数为0.43 m/s(0.61 m/s),冬季反气旋(气旋)的耦合系数为0.37 m/s(0.41 m/s),具体数据如图1所示。

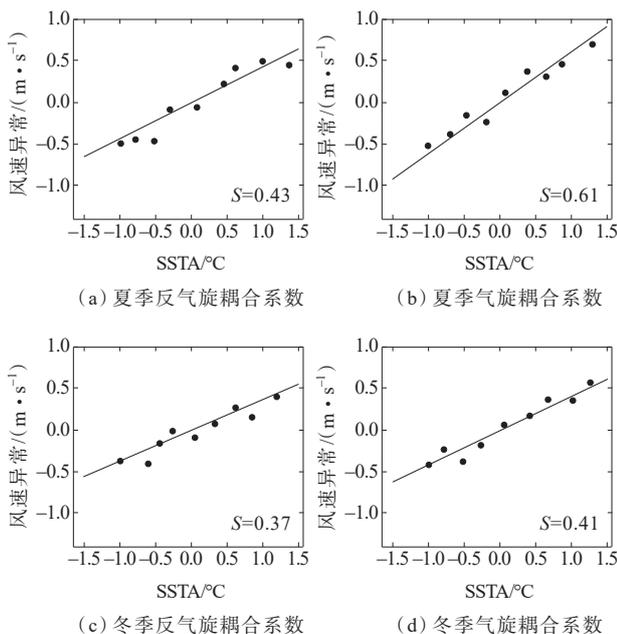


图1 东海气旋(反气旋)耦合系数

Figure 1 Coupling coefficient of cyclone (anticyclone) in the East China Sea

湍流热通量分布形态与SSTA分布密切相关,海洋表层湍流热通量数据来自法国海洋开发研究所。该数据是基于卫星观测数据反演而来,本文主要采用感热通量计算湍流热通量,进而求解SST和

SSTA,计算公式如下:

$$\tau = \rho_E c_d U_{100}^2 \quad (3)$$

$$Q_s = \rho_E c_b c_E U_{100} (T_{SST} - T_{100}) \quad (4)$$

$$T_{SSTA} = \frac{Q_s}{\rho_E c_b c_E U_{100}} \quad (5)$$

式(3)~(5)中, τ 为标量动量; ρ_E 为涡旋处的空气密度; c_b 为空气比热容; c_E 为涡旋感热通量的湍流交换系数; U_{100} 为海表面高度100 m处的风速; T_{SST} 为相应海域的海面温度; T_{100} 为海表面高度100 m的空气温度。海表面风速和海域温差受感热通量影响,其变化趋势呈现明显的季节性,如图2所示。

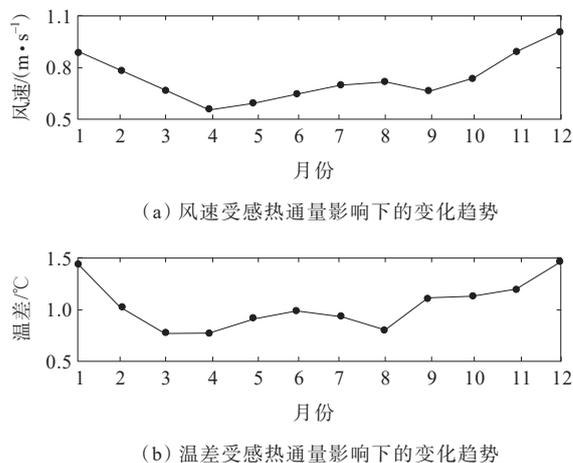


图2 风速及温差受感热通量影响的季节变化

Figure 2 Seasonal variation of variables affected by sensible heat flux

传统模型在进行海上风电场并网系统可靠性评估时,并未考虑中尺度涡的影响,而计及中尺度涡因素时,各风机处的风速以及相应的海上风电场出力会产生季节性变化,引起整个风电并网系统可靠性波动。因此,对风电并网系统进行可靠性分析时,中尺度涡引起的风速变化不可忽略。

2 海气耦合作用影响风速机理

在天气尺度上,海洋涡旋对热带气旋的影响形式主要表现为负反馈^[21]。热带气旋途经中尺度涡时,底层风场带动海洋冷水上翻,引起海水表面温度下降。夏季热带气旋频发,此时中尺度涡的主要表现形式为反气旋暖涡,其较厚的暖水层会抑制冷水上翻进程,削弱负反馈作用,海水表面降温幅度减弱。在北半球范围内,热带气旋经过夏季暖涡后引起的SST平均降温为2~3°C(深度为80~100 m时),内核区域平均SST降温约0.5°C^[22],以某热带气旋经过暖涡为实例,涡旋中海温随深度而变化的

曲线如图3所示。除观测相应海域 SST 变化趋势外,通常使用海洋热容量(oceanic heat content, OHC)描述上层海洋的热量损失状况,该指标与暖涡内 26 °C 等温线的观测数据相关,计算公式如下:

$$C_{\text{OHC}} = \rho c_b \int_0^{D_{26}} (T - 26) dZ \quad (6)$$

式中, ρ 为海水密度; T 为在 dZ 厚度上的温度; D_{26} 为 26 °C 等温线的厚度; Z 为固定深度, 本文选取的固定深度为 80 m。海表面风速将随 SSTA 和 OHC 的波动而不断变化^[23]。

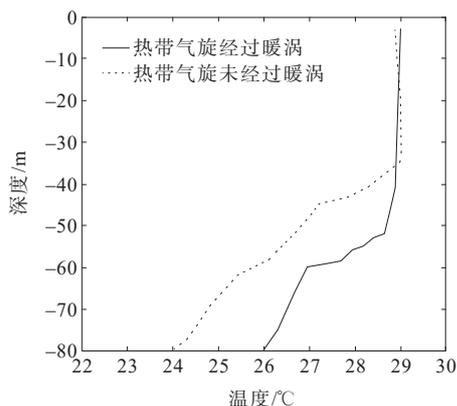


图3 海温随深度的变化曲线

Figure 3 Variation of sea temperature with depth

中尺度涡同时会影响热带气旋的形成和发展。热带气旋经过反气旋暖涡时,气旋强度、最大风速、气旋中心气压、气旋移动速度和气旋强迫时间等特征会迅速改变。暖涡对气旋的影响幅度与气旋初始强度以及经过中尺度涡时的风速成反比^[24]。以台风鲑鱼为例,当台风处于快速强化过程时,暖涡会使台风强化速度增加 29%^[25],计算公式如下:

$$F_{\text{EDDY}} = \frac{\Delta P_{\text{eddy}}}{\Delta P_{\text{noeddy}}} - 1 \quad (7)$$

式中, F_{EDDY} 为台风强化速度增大值; ΔP_{eddy} 为暖涡实验下台风中心气压变化值; ΔP_{noeddy} 为无涡实验下台风中心气压变化值。选取 Batts 台风模型,分析热带气旋的梯度风速,判断热带气旋与中尺度涡相叠加的位置关系,综合确定实际风速值,得出最大梯度风速 V_{gx} 如下:

$$V_{\text{gx}} = K \sqrt{\Delta P(t)} - \frac{R_{\text{max}}}{2} f \quad (8)$$

$$R_{\text{max}} = \exp[-0.1239 \times (1 + F_{\text{EDDY}}) \Delta P^{0.6} + 5.1034] \quad (9)$$

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 - 0.675(1 + \sin \beta)t \quad (10)$$

$$V_{\text{max}} = KV_{\text{gx}} + 0.5V_t \quad (11)$$

式(8)~(11)中, K 为梯度常系数, 本文取值为 0.865; f 为地球自转力参数; R_{max} 为最大风速半径, 热带气旋的风速半径通常与风速呈正相关关系, 在最大风速半径 R_{max} 处, 平均风速通常也最大; V_{max} 为最大风速; $\Delta P(t)$ 是热带气旋经过后 t 时刻的中心气压差, hPa; ΔP_0 为台风登陆前中心气压差, hPa; β 为热带气旋经过时海平面与气旋运动方向的夹角; t 为热带气旋途经的时间, h; V_t 为热带气旋的移动速度, m/s。

综上所述, SSTA、OHC 和 F_{EDDY} 等参数会综合影响深远海海上风电场所处海域上空的风空间分布, 相关参数可查阅 Argo 网站历史资料。因此, 当深远海海上风电场所处海域受海气耦合作用影响时, 该海域的海表面风速会随 SSTA、OHC 和 F_{EDDY} 的波动而不断变化, 海上风电场的输出功率也随之变动, 因此, 将海气耦合作用引入可靠性分析模型更加准确合理。

3 深远海风电场并网发电系统可靠性评估模型

3.1 发电机组可靠性模型

常规火电机组一般采用 2 种状态模型: 状态 1 为正常运行状态; 状态 2 为故障停运状态。平均故障时间(mean time to failure, MTTF) T_{MTTF} 和平均修复时间(mean time to repair, MTTR) T_{MTTR} 由文献[24]给出, 强制停机率 f_{or} 为

$$f_{\text{or}} = \frac{T_{\text{MTTR}}}{T_{\text{MTTR}} + T_{\text{MTTF}}} \quad (12)$$

本文采用了风机三状态模型, 模型如图 4 所示, δ 为故障率; μ 为修复率, 具体数据由历史故障数据统计得出, 转移方向由下标表示。

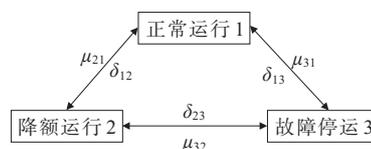


图4 风机三状态模型

Figure 4 Three-state model of wind turbine

状态 1: 正常运行, 风力发电机正常工作, 风机所发功率由实时风速决定。

状态 2: 降额运行, 风机状态异常影响正常运转时, 通过切除负荷保护风机, 输出功率为正常运行状态的 80%。

状态 3: 故障停运, 系统故障导致风机出现停机状态, 此时风机输出功率为 0。

利用马尔可夫过程和全概率理论条件求解风机的三状态模型,可得:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \delta_{12} & -\mu_{21} - \delta_{12} & \mu_{32} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & -\mu_{31} - \delta_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, P_1 、 P_2 、 P_3 分别为风机处于正常运行状态、降额运行状态和故障停运状态的概率。

风机出力的计算公式为

$$P_{ws} = \begin{cases} 0, & v_s < v_{ci} \\ (A + Bv_s + Cv_s^2)P_{wr}, & v_{ci} \leq v_s < v_r \\ P_{wr}, & v_r \leq v_s \leq v_{co} \\ 0, & v_s > v_{co} \end{cases} \quad (14)$$

$$A = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4(v_{ci}v_r) \left(\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 \right] \quad (15)$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[4(v_{ci} + v_r) \left(\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 - (3v_{ci} + v_r) \right] \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 \right] \quad (17)$$

式(14)~(17)中, P_{ws} 为风电机组输出功率; P_{wr} 为风电机组额定功率; v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速; A 、 B 、 C 分别为风电机组功率特性曲线的待定系数; v_s 的计算公式为

$$v_s = \begin{cases} v'_s, & \text{场景0} \\ v'_s + s \cdot \Delta T_s, & \text{场景1} \\ V_{\max} + s \cdot (\Delta T_s + \Delta T), & \text{场景2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta T = \frac{C_{OHC}}{C_0} - 273.15 \quad (19)$$

式(18)、(19)中, v'_s 为海上风场实际风速; ΔT_s 为中尺度涡引起的SST差值, $^{\circ}\text{C}$; ΔT 为海气耦合作用引起的SST差值, $^{\circ}\text{C}$; C_0 为相关海域的热容,场景设定如下。

1) 场景0:海上风电场不考虑中尺度涡和热带气旋影响(作为对照组)。

2) 场景1:海上风电场只考虑中尺度涡,不考虑热带气旋的影响。

3) 场景2:海上风电场考虑了中尺度涡、热带气旋和海气耦合作用的影响。

3.2 储能装置模型

储能装置对平抑风电输出波动,补偿风电功率预测误差,提高系统可靠性有积极的作用。本文介绍了一种铅酸蓄电池储能装置,文献[27]给出了该储能装置的充放电状态模型。蓄电池充放电状态

由并网系统总发电量和负荷量差值、蓄电池的充放电速率及其自身的容量限制共同决定。

当系统总发电量大于负荷时,外部系统功率差额 $\Delta P_a > 0$,储能系统处于充电状态,其充电功率为

$$P_{ci} = \min \{ P_{c,\max}, P_{csoc}, \Delta P_a \} \quad (20)$$

$$P_{csoc} = \frac{(S_{oc,\max} - S_{oct-1})E_m}{\eta_c \Delta t} \quad (21)$$

式(20)、(21)中, P_{ci} 为蓄电池充电功率; $P_{c,\max}$ 为蓄电池最大充电功率约束; P_{csoc} 为蓄电池最大荷电状态约束; S_{oct-1} 为蓄电池上一时刻的蓄电池荷电率; $S_{oc,\max}$ 为设定的蓄电池最大荷电率; E_m 为蓄电池额定容量; η_c 为蓄电池充电效率; Δt 为仿真时间间隔。

当系统总发电量小于负荷时,外部系统功率差额 $\Delta P_a < 0$,储能系统处于放电状态,其放电功率为

$$P_{di} = \min \{ P_{d,\max}, P_{d,soc} - \Delta P_a \} \quad (22)$$

$$P_{d,soc} = \frac{(S_{oct-1} - S_{oc,\min})\eta_d E_m}{\Delta t} \quad (23)$$

式(22)、(23)中, P_{di} 为蓄电池放电功率; $P_{d,\max}$ 为蓄电池最大放电功率约束; $P_{d,soc}$ 为蓄电池最大荷电状态约束; $S_{oc,\min}$ 为设定的蓄电池最小荷电率; η_d 为蓄电池放电效率。

3.3 复杂海洋状况下的海上风电系统可靠性分析

深远海海上风电场运行环境恶劣,本文根据实际经验,考虑中尺度涡以及热带气旋对相关海域中海上风场的可靠性影响。本文选用的中尺度涡数据(感热通量、SST、OHC、涡旋直径、生命周期等)来自Aviso网站和Argo网站历史资料,热带气旋数据来源于2020年8月某过境台风资料^[28],将该台风经过中尺度涡时,上海东海海洋工程勘察设计研究院的观测数据作为 F_{EDDY} 的取值。复杂海洋状况下的海上风电系统可靠性分析思路如下。

在场景0中,海上风电场不受海洋状况影响,计算在风电渗透率不同时,风电并网系统的可靠性参数指标。

中尺度涡主要集中在夏季和冬季,且中尺度涡振幅和半径较大,生命周期较长,故在场景1中,统计海上风场在夏季和冬季均受一次中尺度涡过程影响下的风速数据,根据修正后的风速数据计算风电渗透率不同时风电并网系统的可靠性参数指标。

热带气旋主要集中在夏季,在场景2中,统计海上风场在夏季受到中尺度涡、热带气旋以及两者的海气耦合作用影响下的风速数据,根据修正后的风速数据计算风电渗透率不同时风电并网系统的可

可靠性参数指标。最后,对 3 种场景下系统的可靠性指标进行对比分析。

为实现风电并网系统可靠性的定量评估,本文选取 3 种常用的可靠性指标用以评价系统可靠性水平。负荷期望损失(loss of load expectation, LOLE)是指系统在一定时间间隔内无法满足负载需求的预期时间,其大小 E_{LOLE} 与系统可靠性成反比,即 E_{LOLE} 越大,系统可靠性越低;缺电频率(loss of load frequency, LOLF)是指系统在给定时间间隔内无法满足负载要求的次数,其大小 E_{LOLF} 也与系统可靠性成反比;电量不足期望值(expectation energy not supplied, EENS) E_{EENS} 是指由于电力系统单元的强制停电而导致的供电减少的预期值。 E_{LOLE} 同样与系统可靠性成反比,3 种可靠性参数计算公式如下:

$$E_{LOLE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{8760} I_{ij} \quad (24)$$

$$E_{LOLF} = \sum_{i \in S} F_i \quad (25)$$

$$E_{EENS} = \sum_{j=1}^{8760} I_{ij} (P_{load,j} - P_{ws,j} - P_{tp,j} - P_{sj}) \quad (26)$$

$$I_{ij} = \begin{cases} 1, & P_{load,j} - P_{ws,j} - P_{tp,j} - P_{sj} > 0 \\ 0, & P_{load,j} - P_{ws,j} - P_{tp,j} - P_{sj} \leq 0 \end{cases} \quad (27)$$

式(24)~(27)中, N 为采样年数; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集; F_i 为系统处于状态 i 的频率; I_{ij} 为第 i 年第 j 时段负荷不足标志,负荷不足时取 1,负荷满足时取 0; $P_{load,j}$ 、 $P_{ws,j}$ 、 $P_{tp,j}$ 、 P_{sj} 分别为第 j 时段用户负荷需求量、风电机组总出力、常规机组总出力和储能系统总出力。

4 算例分析

本文以中国东海某海上风电场的风速数据为例,采用序贯蒙特卡罗法,模拟时间间隔为 1 h,模拟次数为 5 000 次。

4.1 算例说明

本文选用改进罗伊·比林顿测试系统(Roy Billinton test system, RBTS)^[29],利用 Python 软件进行仿真计算,年峰值负荷以 2016 年中国沿海某地实际用电峰荷 6 100 MW 为基准,将风场中若干额定容量为 4 MW 的风电机组接入传统系统,常规发电机组与风电集群的总装机容量为 8 000 MW,风电渗透率分别选取 0%、10%、20%、30% 和 40%。风电机组的切入、切出及额定风速分别为 4、12、25 m/s。储能系统模型参数如表 1 所示,风机模型参数如表 2 所示。

表 1 储能系统模型参数

Table 1 Model parameters of energy storage system

充电效率	最大荷电率	计算周期/h	放电效率	最小荷电率	仿真时间间隔/h
0.927	0.95	9 736	0.927	0.20	1

表 2 风机模型参数

Table 2 Model parameters of wind turbine

故障率	取值/(次·a ⁻¹)	修复率	取值/(次·a ⁻¹)
δ_{12}	5.84	μ_{12}	48.3
δ_{13}	7.96	μ_{13}	58.4
δ_{23}	0	μ_{23}	0

本文风速数据来自中国东海某海上风电场的实际运行数据。本部分在传统可靠性评估理论基础上,进一步考虑中尺度涡、热带气旋以及两者的海气耦合作用对风电并网系统可靠性的影响。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 风电渗透率对并网系统可靠性的影响

根据本文介绍的风电并网系统建模方法,计算在风电渗透率不同时,3 种场景下的系统可靠性参数,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同风电渗透率下的系统可靠性参数

Table 3 Reliability parameters of system at different wind power penetration levels

风电渗透率/%	时间跨度	场景 0			场景 1			场景 2		
		$E_{LOLE}/(h \cdot a^{-1})$	$E_{LOLF}/(\text{次} \cdot a^{-1})$	$E_{EENS}/(MW \cdot h \cdot a^{-1})$	$E_{LOLE}/(h \cdot a^{-1})$	$E_{LOLF}/(\text{次} \cdot a^{-1})$	$E_{EENS}/(MW \cdot h \cdot a^{-1})$	$E_{LOLE}/(h \cdot a^{-1})$	$E_{LOLF}/(\text{次} \cdot a^{-1})$	$E_{EENS}/(MW \cdot h \cdot a^{-1})$
0	整年	1.26	0.36	357.57	1.26	0.36	357.57	1.26	0.36	357.57
	夏季	0.13	0.03	41.43	0.13	0.03	41.43	0.13	0.03	41.43
	冬季	0.56	0.21	188.96	0.56	0.21	188.96	0.56	0.21	188.96
10	整年	3.69	1.41	1 168.38	4.26	1.47	1 311.58	4.45	1.59	1 526.26
	夏季	0.87	0.33	271.46	0.77	0.26	227.93	0.84	0.31	248.07
	冬季	1.98	0.87	665.68	2.29	1.01	711.48	2.29	1.01	711.48

续表3

风电渗透率/%	时间跨度	场景0			场景1			场景2		
		$E_{LOLE}/$ ($h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLF}/$ (次 $\cdot a^{-1}$)	$E_{EENS}/$ ($MW \cdot h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLE}/$ ($h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLF}/$ (次 $\cdot a^{-1}$)	$E_{EENS}/$ ($MW \cdot h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLE}/$ ($h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLF}/$ (次 $\cdot a^{-1}$)	$E_{EENS}/$ ($MW \cdot h \cdot a^{-1}$)
20	整年	33.36	15.03	9 603.91	35.51	15.45	10 627.78	37.86	17.02	11 350.04
	夏季	7.10	3.94	1 803.64	6.22	2.77	1 610.92	6.82	3.62	1 759.82
	冬季	16.82	8.12	6 053.57	20.23	8.89	6 539.61	20.23	8.89	6 539.61
30	整年	240.26	108.23	81 774.21	247.14	109.01	84 661.55	254.67	113.79	91 024.52
	夏季	60.76	27.28	19 824.22	51.15	21.73	16 994.56	56.83	23.81	19 212.07
	冬季	142.86	66.89	53 731.66	157.86	67.35	58 656.49	157.86	67.35	58 656.48
40	整年	531.41	252.70	180 738.69	537.79	254.67	186 390.84	548.43	264.01	193 621.86
	夏季	132.83	65.29	40 130.07	118.88	60.04	35 834.98	125.84	62.39	37 790.65
	冬季	253.34	108.27	101 771.66	274.12	112.79	108 543.67	274.12	112.79	108 543.67

由表3可知,风电并网系统的可靠性水平随着风电渗透率的增加而逐渐降低,这是由于风速的随机性和波动性导致。为突出深远海风电场特性,讨论复杂海洋状况对综合系统的影响,选用风电渗透率为40%时的计算结果进行着重分析。

4.2.2 中尺度涡对风电并网系统可靠性的影响

中尺度涡是东海海域中常见的物理现象,且主要出现在夏季和冬季。中尺度涡影响下的整年、夏季及冬季的风电并网系统可靠性参数如表4所示。

表4 考虑中尺度涡对可靠性参数的影响趋势

Table 4 Influence of mesoscale eddies on reliability parameters

时间跨度	场景	$E_{LOLE}/$ ($h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLF}/$ (次 $\cdot a^{-1}$)	$E_{EENS}/$ ($MW \cdot h \cdot a^{-1}$)
夏季	0	132.83	65.29	40 130.07
	1	118.88	60.04	35 834.98
冬季	0	253.34	108.27	101 771.66
	1	274.12	112.79	108 543.67
整年	0	531.41	252.70	180 738.69
	1	537.79	254.67	186 390.84

在夏季,场景1的系统 E_{LOLE} 下降了约10.50%, E_{LOLF} 降低了5.25次, E_{EENS} 下降了4 295.09 MW·h;而在冬季, E_{LOLE} 则会上升约8.20%, E_{LOLF} 提高了4.60次, E_{EENS} 增加了6 763.01 MW·h/a,这些结果和趋势表明,夏季暖涡提高了相关海域的风速,增加了风场出力,提高了风电并网系统的可靠性,场景1的性能优于场景0;而冬季冷涡的影响机理相反,风电并网系统可靠性下降,场景0性能优于场景1。当时间跨度为整年时,场景1的 E_{LOLE} 增加了约1.20%, E_{LOLF} 提高了1.97次, E_{EENS} 增加了5 652.15 MW·h/a,系统

的可靠性小幅度下降,这是由于季节不同时,中尺度涡对风电并网系统的影响趋势相反,且冬季时SSTA和WSA的变化幅度均高于夏季。

综上所述,虽然中尺度涡对风电并网系统全年的可靠性影响较小,但对单季度的影响不可忽视。

4.2.3 中尺度涡及热带气旋对风电并网系统可靠性的影响

在夏季,东海海域热带气旋频发,计算中尺度涡、热带气旋影响下的夏季和整年的风电并网系统可靠性参数,详细数据如表5所示。

表5 考虑中尺度涡及热带气旋对可靠性参数的影响趋势

Table 5 Influence of mesoscale eddies and tropical cyclones on reliability parameters

时间跨度	场景	$E_{LOLE}/$ ($h \cdot a^{-1}$)	$E_{LOLF}/$ (次 $\cdot a^{-1}$)	$E_{EENS}/$ ($MW \cdot h \cdot a^{-1}$)
夏季	0	132.83	65.29	40 130.07
	1	118.88	60.04	35 834.98
整年	2	125.84	62.39	37 790.65
	0	531.41	252.70	180 738.69
整年	1	537.79	254.67	186 390.84
	2	548.43	264.01	193 621.86

分析可得,在夏季,场景2的系统 E_{LOLE} 值比场景0下降了约5.26%,比场景1增加了约5.85%, E_{LOLF} 和 E_{EENS} 也呈现出类似的趋势。这是因为热带气旋及中尺度暖涡都会使相关海域的风速加快,虽然气旋带来的冷水上翻会使SST有所降低,但气旋经过暖涡后强度上升,进一步提升了底层风场风速,从而增大风场出力,场景2的可靠性高于场景0;然而热带气旋会加剧风速不稳定性,威布尔拟合数据波动大,风电并网系统可靠性有所降低。因此,场景2的可靠性低于场景1。

系统整年的可靠性变化则呈现另一种趋势。在表5中,场景2系统的 E_{LOLE} 比场景0增加了约3.20%,比场景1增加了约1.98%。这是因为冬季中尺度涡影响较大,系统可靠性显著降低,同时由于热带气旋集中在夏季,风速的大幅度变化会降低系统的可靠性,此时场景0性能最好,场景1处于中等水平,而场景2可靠性最差。

此外,经实验表明,系统可靠性的具体数据会根据过境热带气旋的强度有所区别,但整体趋势基本保持不变。

4.2.4 储能装置对风电并网系统可靠性的影响

在冬季时,中尺度涡会使风电并网系统的可靠性显著下降,且中尺度涡、热带气旋及二者的海气耦合作用会使系统整年的可靠性有所下降。因此本节将研究储能装置在上述2种场景下对系统可靠性的影响。当储能装置的最大充放电功率分别为额定容量的30%、50%和80%,风电渗透率为40%,储能容量从0 MW增加到500 MW时,系统可靠性指标的变化趋势如图5、6所示。

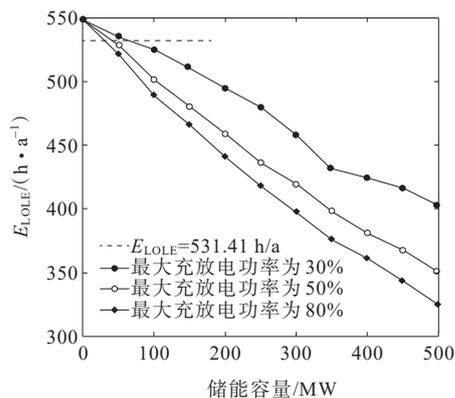


图5 储能系统接入对整年 E_{LOLE} 的影响

Figure 5 Influence of energy storage system access on annual E_{LOLE}

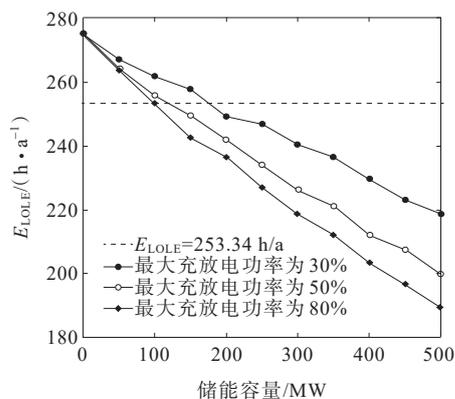


图6 储能系统接入对冬季 E_{LOLE} 的影响

Figure 6 Influence of energy storage system access on E_{LOLE} in winter

由图5、6可以看出,对高比例风电接入的风电并网系统,采取储能装置能够有效提升风电并网系统的可靠性。在最大充放电功率为30%时,81 MW的储能容量可以减弱中尺度涡和热带气旋对系统可靠性的影响,在冬季需要的储能容量则为182 MW。随着最大充放电功率逐渐增加,补偿复杂海洋状况对风电并网系统影响所需的储能容量逐渐减少。当最大充放电功率为50%时,对应的存储容量分别要求为53 MW和128 MW,当最大充放电功率提高到80%时,配置35 MW和103 MW即可达到补偿的目的。

结果表明,在高风电渗透率的前提下,提高储能系统最大充放电功率可有效降低储能单元的容量需求,提高风电并网系统可靠性。因此,储能系统是大型深远海海上风电集成系统可靠性的有效工具。

5 结语

本文提出了一种考虑中尺度涡和热带气旋影响的深远海海上风电场并网系统的可靠性模型;对海洋和天气条件相关的随机变量进行概率建模,利用东海某风电场的数值气象记录,研究海洋和天气条件因素对风电并网系统可靠性的影响。本文的研究成果总结如下。

与原系统相比,考虑中尺度涡或同时考虑中尺度涡与热带气旋时,风电并网系统可靠性指标 E_{LOLE} 、 E_{LOLF} 和 E_{EENS} 都有一定变化,且变化趋势具有明显的季节特征。可靠性在夏季呈上升趋势,冬季呈下降趋势;当时间跨度为整年时,风电并网系统的可靠性呈下降趋势。随着风电渗透率的增加,上述变化会更为明显。储能装置能够提升高比例风电接入时的系统可靠性,增大储能装置的最大充放电功率可以降低所需储能容量。中尺度涡和热带气旋引起海上风场故障率的波动没有被考虑,将是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] ZHU X, LIU C M, SU C B, et al. Learning-based probabilistic power flow calculation considering the correlation among multiple wind farms[J]. IEEE Access, 2020,8:136782-136793.
- [2] 孙志媛,李海波,鲁宗相.考虑连锁故障的大电网可靠性评估[J].电力科学与技术学报,2015,30(1):67-72.

- SUN Zhiyuan, LI Haibo, LU Zongxiang. Power system reliability evaluation considering cascading failures[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2015, 30(1):67-72.
- [3] 符杨, 苗育植, 黄玲玲, 等. 基于改进贝叶斯网络的风电机组动态可靠性评估[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(11): 32-39.
- FU Yang, MIAO Yuzhi, HUANG Lingling, et al. Dynamic reliability evaluation of wind turbine based on improved Bayesian network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(11):32-39.
- [4] 徐路. 考虑台风影响的海上风电接入系统可靠性评估及优化措施研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- XU Lu. Reliability evaluation and optimization measures of offshore wind power integration system considering the influence of typhoon[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [5] 石嫻嫻, 和庆冬, 吴衍剑, 等. 基于多失效模式的海上浮式风电机组结构可靠性研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9):236-241.
- SHI Yuanyuan, HE Qingdong, WU Yanjian, et al. Multi-mode reliability analysis on structural of offshore floating wind turbine[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(9):236-241.
- [6] 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.
- [7] WU Y J, FAN T T, HUANG T. Electric power distribution system reliability evaluation considering the impact of weather on component failure and pre-arranged maintenance[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:87800-87809.
- [8] CHAO H W, HU B, XIE K G, et al. A sequential MCMC model for reliability evaluation of offshore wind farms considering severe weather conditions[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:132552-132562.
- [9] 王雨欣, 王思怡, 杨黎晖, 等. 超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略[J]. *高压电器*, 2023, 59(4):177-185.
- WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(4):177-185.
- [10] 陈泽西, 王朴, 田禾, 等. 基于负荷特征的有源配电网供电可靠性监测研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(5):65-70+78.
- CHEN Zexi, WANG Pu, TIAN He, et al. A study on power supply reliability monitoring of active distribution networks based on load characteristics[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(5):65-70+78.
- [11] YANG Z B, WANG G H, CHEN C L. Horizontal velocity structure of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 149:103055.
- [12] LIU M Y, HU J H, LIN Y, et al. Full-depth profiles of PAHs in the Western South China Sea: influence of upwelling and mesoscale eddy[J]. *Chemosphere*, 2021: 127933
- [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] WANG Q, LUO K, YUAN R Y, et al. Wake and performance interference between adjacent wind farms: case study of Xinjiang in China by means of mesoscale simulations[J]. *Energy*, 2019, 166:1168-1180.
- [15] MA Z H, ZHANG Z L, FEI J F, et al. Imprints of tropical cyclones on structural characteristics of mesoscale oceanic eddies over the Western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(10):e92601.
- [16] 马增泰, 罗萍萍, 孙天杰, 等. 基于蒙特卡洛方法的覆冰导线舞动跳闸概率计算[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(3):140-148.
- MA Zengtai, LUO Pingping, SUN Tianjie, et al. The tripping probability calculation of iced conductor galloping based on Monte Carlo method[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(3):140-148.
- [17] WANG J, GAO X, CAO R N, et al. A multilevel Monte Carlo method for performing time-variant reliability analysis[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:31773-31781.
- [18] 马燕峰, 骆泽榕, 赵书强, 等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(9):75-83.
- MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(9):75-83.
- [19] 张桃, 李君益, 谢玲玲, 等. 东海陆架区中尺度涡运动路径的统计特征分析[J]. *海洋学研究*, 2020, 38(1):77-86.
- ZHANG Tao, LI Junyi, XIE Lingling, et al. Statistical characteristics and path analysis of mesoscale eddy in

- the East China Sea[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2020, 38(1):77-86.
- [20] 宋明阳, 瞿晟珉, 秦少茜, 等. 基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 117-129.
SONG Mingyang, QU Shengmin, QIN Shaoxi, et al. Offshore wind farm opportunity maintenance strategy based on failure risk level[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 117-129.
- [21] ZHAO Z Z, ZHOU J Y, DU H D. Artificial intelligence powered forecast of oceanic mesoscale phenomena: a typhoon cold wake case occurring in northwest Pacific Ocean[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2022, 129:389-398.
- [22] 祖永灿, 孙双文, 赵玮, 等. 南海中尺度涡上海面热通量异常的季节变化[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(1):11-21.
ZU Yongcan, SUN Shuangwen, ZHAO Wei, et al. Seasonal characteristics and mechanism of the sea surface heat fluxes associated with mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(1): 11-21.
- [23] 杨薇, 蔡亲波, 李勋, 等. 海洋暖涡对“威马逊”(2014)影响的观测和模拟研究[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(1): 165-174.
YANG Wei, CAI Qinbo, LI Xun, et al. Observational and numerical study of impacts of ocean warm eddy on Rammasun (2014)[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(1):165-174.
- [24] 王桂华, 卢著敏, 孙佳. 台风-涡旋相互作用研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(4):755-762.
WANG Guihua, LU Zhumin, SUN Jia. Advances in interactions between typhoons and ocean eddies[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(4):755-762.
- [25] 邵彩霞. 海洋暖涡对台风快速强化过程作用机制的数值研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2017.
SHAO Caixia. A numerical study of ocean warm eddy impacts on the rapid intensification of typhoon[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [26] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, PAS-98(6):2047-2054.
- [27] 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.
- [28] 时帅, 吴慧娴, 黄冬梅, 等. 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[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(10):172-179.
SHI Shuai, WU Huixian, HUANG Dongmei, et al. Energy storage capacity configuration of an offshore wind farm considering the influence of complex ocean climate conditions[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(10):172-179.
- [29] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(3): 1238-1244.