

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240483

考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的 海上风氢系统灵活调度

张磊^{1,2}, 王满康^{1,2}, 随权³, 叶婧^{1,2}, 邱元城^{1,2}, 陶千惠^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了降低海上风电场维护次数频繁所带来的高昂成本, 提高海上风电的消纳率, 提出一种考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度方法。首先, 量化分析风电机组的疲劳载荷与风电出力、疲劳成本之间的关系, 建立了场间-场内风电机组疲劳载荷均衡模型, 协调风力发电与疲劳载荷之间的关系。然后, 考虑海上天气因素的多变性, 提出船舶自适应航行模型。进而, 采用柔性直流输电, 建立了电氢并举的能量流灵活外送模型。最后, 以系统运行总成本最小为目标, 提出考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度策略。仿真结果表明, 相对于传统调度策略, 所提的调度策略能够均衡场间疲劳载荷, 同时有效地减小场内疲劳载荷差异, 经济性提高了 8.11%。

关键词: 疲劳载荷; 能量流; 海上风氢系统; 运氢船舶; 灵活调度

Flexible scheduling of offshore wind-hydrogen systems considering inter-and intra-field turbine fatigue load balancing

ZHANG Lei^{1,2}, WANG Mankang^{1,2}, SUI Quan³, YE Jing^{1,2}, QIU Yuancheng^{1,2}, TAO Qianhui^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To reduce the high cost caused by frequent maintenance of offshore wind farms and to improve the consumption rate of offshore wind power, a flexible scheduling method for an offshore wind-hydrogen system considering the fatigue load balance of inter-field and intra-field wind turbines is proposed. First, the relationship between the fatigue load of the wind turbine and the wind power output and the fatigue cost is quantitatively analyzed, and an inter-field-in-field wind turbine equilibrium load model is established to coordinate the relationship between wind power generation and fatigue load. Then, considering the variability of marine weather factors, a ship adaptive navigation model is proposed. Also, a flexible energy flow transmission model of electricity and hydrogen is established by using flexible HVDC transmission. Finally, with the goal of minimizing the total cost of system operation, a flexible scheduling strategy for an offshore wind-hydrogen system considering the fatigue load balance of inter-field and in-field wind turbines is proposed. The simulation results show that compared with the traditional scheduling strategy, the proposed strategy can both balance the inter-field fatigue load and effectively reduce the difference of fatigue load in the field, and economy is improved by 8.11%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62233006, No. 52307149 and No. 52007103).

Key words: fatigue loading; energy flow; offshore wind-hydrogen systems; hydrogen-carrying ships; flexible scheduling

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62233006, 52307149, 52007103)

0 引言

在应对全球能源结构转型和气候变化的挑战中,海上风氢系统以其多种能源转化和高效用能特征,正逐渐成为国际能源发展的重点^[1-3]。然而,海上风氢系统在运行中面临极端气候条件和复杂海洋环境的双重挑战,且海上风电场远离陆地,导致风机维修成本高^[4]。此外,受限于地质条件和复杂多变的气象,氢能运输同样也面临着巨大挑战。因此,如何在保障海上风氢系统高效稳定运行的同时降低成本是目前亟需解决的问题。

近年来,为降低海上风电场的检修成本,海上风电机组疲劳载荷均衡引起了学界的广泛关注,并取得了显著的成果。文献[5]提出一种有功功率优化调度策略,通过调整风机的有功功率,解决了海上风电场长期运行时疲劳载荷分布不均的问题;文献[6]提出一种海上风电场的有功功率优化调度策略,该策略在捕获最大风能的同时考虑了风机疲劳载荷的分布;文献[7]提出一种改进的海上风电场风机疲劳平衡功率控制方法,将参考功率重新分配给风机,平衡了风机疲劳载荷的同时降低了风电场总的平均疲劳载荷;文献[8]以综合功率提升和疲劳平衡为优化目标,提出一种以天为优化周期的优化策略;文献[9]提出一种考虑风机疲劳载荷分布的海上风电场有功功率优化调度策略,可有效解决由于风机疲劳载荷分布不均导致的频繁出海维护问题。文献[10]基于智能体理论,以每个风机的疲劳载荷标准差最小为目标,提出一种海上风电场风机疲劳分布的控制方法。然而,上述文献聚焦于风电场内部疲劳载荷来优化各机组的出力,忽视了风电场之间的疲劳载荷均衡。此外,上述研究忽略了多种能源之间的转换,导致海上风电难以大规模消纳,系统的经济性欠优。

随着氢能消费需求的日益增长,国内外学者针对电氢联合调度展开研究,并取得了许多卓有成效的成果。文献[11]提出了一种基于可再生加氢站和车队的综合能源移动系统,采用基于穷举搜索和遗传算法的启发式算法求解,促进了氢能综合运输和电力系统发展;文献[12]针对电氢混合储能的综合能源系统,提出一种基于两阶段分布式鲁棒优化的调度模型,第一阶段解决日前最优调度问题,第二阶段确定日内重新调度问题;为充分挖掘氢能的弹性来优化综合能源系统运行,文献[13]将储氢有功负荷纳入热电联产系统,建立了考虑储氢有功负荷电力需求弹性的最优调度模型;文献[14]以灵活性供需平衡作为新增约束,建立计及灵活性供需平衡

约束的含电转氢综合能源系统优化调度模型,有效应对风电的不确定性。文献[15]提出一种基于移动式储能的能量变速传输模型,该模型不仅考虑了航行速度的多样性,还考虑了氢电供应能力。上述模型主要依赖于交流电网来传输电能,而海上风电可能采用直流网络进行输电,两者特性不同。在氢能运输方面,上述工作主要采用长管拖车运输氢气,且假定运输过程中长管拖车速度恒定不变,而船舶在海上航行时航速会受到海上气象条件的影响,船舶需要调整速度以适应不同海况,氢能传输的灵活性不同。

为此,本文提出一种考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度方法。首先,考虑风电场检修便利性,提出场间-场内均衡载荷模型。然后,考虑天气因素的多变性,建立船舶自适应航行模型。进而,建立了电氢并举的能量流灵活外送模型。最后,以系统运行总成本最小为目标,提出考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度模型。通过算例验证了所提方法的有效性。本文的主要创新点如下所述。

- 1) 建立场间-场内均衡载荷模型。其中,提出一种功率分配函数,建立了场内疲劳载荷均衡模型;考虑了检修便利性,建立了场间疲劳载荷均衡模型。
- 2) 考虑海上天气因素的多变性,建立船舶自适应航行模型。
- 3) 提出考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度策略。

1 场间-场内风电机组疲劳载荷均衡模型

1.1 场内疲劳载荷均衡模型

疲劳载荷用于确定风电机组在实际运行中的损伤情况,从而确定风电机组的维修时间,风电机组的疲劳载荷模型^[5]为

$$F_{m,i,t} = F_{m,i,t_0} + (1 + \gamma) \frac{\int_{t_0}^t P_{m,i,t} dt}{P_{m,i}^{\text{rate}} T_{\text{life}} (1 + R_{\text{com}})}, \forall i \in \Phi_m \quad (1)$$

式中: $F_{m,i,t}$ 、 F_{m,i,t_0} 分别为 t 、 t_0 时刻风机 i 的疲劳载荷; γ 为扰动疲劳与工作疲劳之比,是经验参数; $P_{m,i,t}$ 为 t 时刻风机 i 的有功功率; $P_{m,i}^{\text{rate}}$ 为风机 i 的额定功率; T_{life} 为风机设计使用寿命; R_{com} 为补偿系数; Φ_m 为风电场及其泊位集合。

通过平衡风电场内部风电机组的疲劳载荷,使各机组的检修时间基本一致,则可以减少维修次数,从而减少检修成本。为实现风电场内部风机疲劳载荷的均衡,可构建场内疲劳载荷均衡模型^[5]为

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_{m,i,t} = \left[\frac{P_{m,i,t}}{\sum_{i=1}^{N_1} P_{m,i,t}^{\max}} + \lambda_{m,t} \delta(F_{m,i,t}) \right] P_{m,i,t}^{\max} \\
 \lambda_{m,t} \sum_{i=1}^{N_1} \delta(F_{m,i,t}) P_{m,i,t}^{\max} = 0 \\
 \lambda_{m,t} = \min \left\{ \frac{C_{m,i,t}}{|\delta(F_{m,i,t})|} \right\} \\
 \delta(F_{m,i,t}) = \frac{P_{m,max}^{\text{rate}} \left(\frac{N_1}{F_{m,i,t}} - \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{F_{m,i,t}} \right)}{P_{m,i,t}^{\max} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{F_{m,i,t}}} \\
 C_{m,i,t} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{N_1} P_{m,i,t}^{\max} - P_{m,t}}{\sum_{i=1}^{N_1} P_{m,i,t}^{\max}}, \delta(F_{m,i,t}) \geq 0 \\ \frac{P_{m,t}}{\sum_{i=1}^{N_1} P_{m,i,t}^{\max}} - \frac{P_{m,i,t}^{\min}}{P_{m,i,t}^{\max}}, \delta(F_{m,i,t}) < 0 \end{cases}
 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $P_{m,t}$ 为 t 时刻风电场 m 的功率; N_1 为风机数量; $P_{m,i,t}^{\max}$ 、 $P_{m,i,t}^{\min}$ 分别为 t 时刻风机 i 的最大、最小出力; $\lambda_{m,t}$ 为平衡载荷的系数; $\delta(\cdot)$ 为补偿函数; $C_{m,i,t}$ 为补偿系数; $P_{m,max}^{\text{rate}}$ 为风机的最大额定功率。

1.2 场间疲劳载荷均衡模型

风电场的疲劳载荷为其内部所有的风机疲劳载荷之和, 可表示为

$$F_{m,t} = \sum_{i=1}^{N_1} F_{m,i,t}, i \in \Phi_m \quad (3)$$

式中, $F_{m,t}$ 为 t 时刻风电场 m 的疲劳载荷。

事实上, 同一海域中可建设多个风电场, 若风电场之间的疲劳载荷相差较小, 认为风电场间的疲劳载荷达到均衡, 从而可以进一步减少维修次数带来的维修成本, 场间疲劳载荷均衡模型可表示为

$$C_{Fa} = \begin{cases} C_F, 1 - \kappa \leq \frac{F_m}{F_n} \leq 1 + \kappa \\ C_F + C_{FP}, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$C_F = \sum_{t=1}^T \sum_m c_m F_{m,t} \quad (5)$$

$$C_{FP} = \sum_{t=1}^T \sum_m \mu_m F_{m,t} \quad (6)$$

$$F_m = \sum_{t=1}^T F_{m,t}, F_n = \sum_{t=1}^T F_{n,t} \quad (7)$$

式中: C_{Fa} 为总疲劳载荷成本; C_F 为疲劳载荷成本; κ 为常数; F_m 、 F_n 分别为调度周期内风电场 m 、风电场 n 的总疲劳载荷值; C_{FP} 为疲劳载荷惩罚成本; T 为调度时段; c_m 为疲劳载荷成本系数; μ_m 为疲劳载荷惩罚系数; $F_{n,t}$ 为 t 时刻风电场 n 的疲劳载荷。

2 考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度模型

考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度模式如图 1 所示。由图 1 可知, 总体调度中心考虑到陆地的能量需求和氢气价格, 对海上风电场和船舶联合调度, 通过优化海上风电场的出力、制氢功率和船舶的时空分布, 使系统总成本最低。

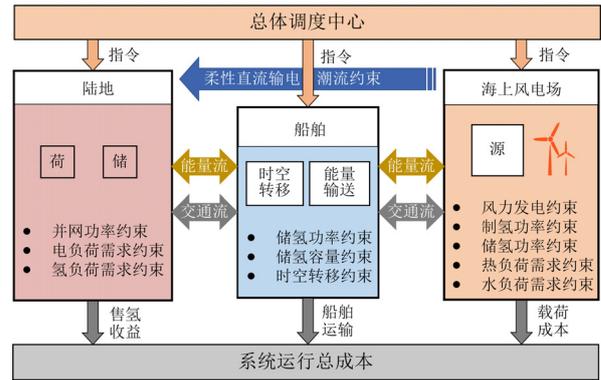


图 1 考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度

Fig. 1 Flexible scheduling of offshore wind-hydrogen systems considering inter- and intra-field turbine fatigue load balancing

2.1 目标函数

在满足各类能源需求的情况下, 提出最小化系统总成本, 并考虑氢气收益, 目标函数可表示为

$$C_{\text{all}} = \min(C_1 + C_2 + C_3 + C_{Fa} - C_4) \quad (8)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^T \sum_{r=1}^{N_2} c_r P_{r,t}^{\text{run}} \quad (9)$$

$$C_2 = \sum_{t=1}^T c_{\text{ship}} Q_{ij,t}^k \quad (10)$$

$$C_3 = \mathcal{J}S_w \quad (11)$$

$$C_4 = c_H (m_H - \bar{m}_H) \quad (12)$$

式中: C_{all} 为系统总成本; C_1 为设备运维成本; C_2 为船舶航行成本; C_3 为风电场检修成本; C_4 为售

氢收益； N_2 为设备总数； c_r 为第 r 类设备的运维成本系数； $P_{r,t}^{\text{run}}$ 为第 r 类设备的运行功率； c_{ship} 为船舶的航行成本系数； $Q_{ij,t}^k$ 为 t 时刻船舶的耗氢量； g 为日等值检修次数； S_w 为单次检修成本； c_H 为氢气售价； m_H 为调度周期内船舶输送至陆地的氢气总量； \bar{m}_H 为陆地氢负荷的基准值。

2.2 运氢船舶灵活航行约束

船舶在海上航行时，不可避免地会受到大风的影响，船舶需要降低航速以确保船体的安全性，同时在正常天气情况下，船舶也可以选择不同的速度进行航行。为此，船舶不同航行模式可表示为

$$\begin{cases} v_{ij,t}^k = f_v(v_{ij,t}^{\text{wind}}) \\ P_{ij,t}^k = h(v_{ij,t}^k)^3 \\ \xi_{ij,t}^k = \left\lfloor \frac{S_{ij}}{v_{ij,t}^k} \right\rfloor \end{cases} \quad (13)$$

式中： $v_{ij,t}^k$ 为 t 时刻船舶在 k 挡的速度； $f_v(\cdot)$ 为速度函数； $v_{ij,t}^{\text{wind}}$ 为 t 时刻的风速； $P_{ij,t}^k$ 为 t 时刻船舶以 k 挡航行的耗氢功率； h 为航速系数； $\xi_{ij,t}^k$ 为 t 时刻船舶以 k 挡在位置 i 和位置 j 之间的航行时间； S_{ij} 为位置 i 和位置 j 之间的距离；“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”表示取整运算。

考虑船舶的移动特性，使用布尔型变量 $I_{i,t}$ 表示船舶在位置 i 的停靠标志； I_t^k 表示船舶以 k 挡的航行标志；船舶的时空转移约束可表示为

$$\sum_{i \in A} I_{i,t} + \sum_{k \in \Phi_k} I_t^k = 1, \forall t \quad (14)$$

$$I_{i,0} = I_{i,T} \quad (15)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+\xi_{ij,t}^k-1} I_{i,\tau+1} \leq \xi_{ij,t}^k (1 - I_{j,t}), \forall t, i \neq j \quad (16)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+\xi_{ij,t}^k-1} I_{i,\tau+1} \leq \xi_{ij,t}^k (1 - I_{j,t}) + D \sum_{k'=1}^{k-1} I_{t+1}^{k'}, \forall t, i \neq j \quad (17)$$

$$\sum_{k \in \Phi_k} (I_{t+1}^k - I_t^k) = \sum_{i \in A} I_{i,t} - \sum_{i \in A} I_{i,t+1}, \forall t, i \neq j \quad (18)$$

$$\begin{cases} I_{t+1}^1 + I_{t+1}^2 \leq 1, & v_{ij,t}^{\text{wind}} < v_{ij,\text{max}}^{\text{wind}} \\ I_{t+1}^1 = 0, I_{t+1}^2 \in \{0,1\}, & v_{ij,t}^{\text{wind}} \geq v_{ij,\text{max}}^{\text{wind}} \end{cases} \quad (19)$$

式中： A 为位置集合； Φ_v 为船舶的速度挡位集合； $I_{i,0}$ 、 $I_{i,T}$ 分别为调度初始时刻、结束时刻船舶的停靠标志； $\xi_{ij,t}$ 为位置 i 和位置 j 之间的最短航行时间； $I_{i,\tau+1}$ 为 $\tau+1$ 时刻船舶在位置 i 的停靠标志； $I_{j,t}$ 为船舶在位置 j 的停靠标志； $I_{i,t+1}$ 为 $t+1$ 时刻船舶在位置 i 的停靠标志； D 为正数； $I_{t+1}^{k'}$ 、 I_{t+1}^k 、 I_{t+1}^1 、 I_{t+1}^2 分别为 $t+1$ 时刻船舶 k' 挡、 k 挡、 k_1 挡、 k_2 挡航行的标志； $v_{ij,\text{max}}^{\text{wind}}$ 为影响船舶正常航行的风速。

在满足时空转移约束前提下，船舶由其所存氢气提供航行功率，船舶的能量外送模型可表示为

$$E_t^{\text{ship}} = E_{t-1}^{\text{ship}} + P_{i,t}^{\text{cha}} \eta^{\text{ship}} - \frac{P_{i,t}^{\text{dis}}}{\eta^{\text{ship}}} - Q_{ij,t}^k \quad (20)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{cha}} \leq u_{i,t}^{\text{cha}} P_{\text{max}}^{\text{cha}}, \forall i \in \Phi_m \quad (21)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq u_{i,t}^{\text{dis}} P_{\text{max}}^{\text{dis}}, \forall i \in \Phi_f \quad (22)$$

$$Q_{ij,t}^k = I_t^k P_{ij,t}^k, \forall k, t \quad (23)$$

$$E_0^{\text{ship}} = E_T^{\text{ship}} \quad (24)$$

$$E_{\text{min}}^{\text{ship}} \leq E_t^{\text{ship}} \leq E_{\text{max}}^{\text{ship}}, \forall t \quad (25)$$

式中： E_t^{ship} 、 E_{t-1}^{ship} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻船舶的氢气量； $P_{i,t}^{\text{cha}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻船舶在位置 i 的充、放氢功率； η^{ship} 为充、放氢效率； $P_{\text{max}}^{\text{cha}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{dis}}$ 分别为最大充、放氢功率； $u_{i,t}^{\text{cha}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{dis}}$ 为布尔型变量，表示船舶的充、放氢标志； Φ_f 为陆地泊位集合； $E_{\text{min}}^{\text{ship}}$ 、 $E_{\text{max}}^{\text{ship}}$ 、 E_0^{ship} 、 E_T^{ship} 分别为最小、最大、调度初始时刻、调度结束时刻船舶的氢气量。

2.3 潮流约束

与节点 x 相连的制氢装置、电负荷、风电场和火电机组出力共同决定该点注入的有功功率和无功功率，即

$$\begin{cases} P_{x,t} = P_{m,t} - P_{h,t} - P_{d,t}^{\text{des}} - P_{z,t}^{\text{com}}, & m, h, d, z \in \Phi_x \\ Q_{x,t} = Q_{m,t}, & m \in \Phi_x \end{cases} \quad (26)$$

式中： $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 x 注入的有功功率、无功功率； $P_{h,t}$ 为 t 时刻制氢设备 h 的功率； $P_{d,t}^{\text{des}}$ 为 t 时刻海水淡化化设备 d 的功率； $P_{z,t}^{\text{com}}$ 为 t 时刻压缩机 z 的功率； Φ_x 为节点集合； $Q_{m,t}$ 为 t 时刻风电场 m 的无功功率。

风电场集群中的交流汇集网络通常是放射状网络，电压等级在 35 kV 左右，可用支路潮流模型来描述，详见文献[16]。

直流传输网络正常运行时具有径向结构，因此同样可用支路潮流方程来描述，详见文献[16]。

2.4 关键设备运行约束

关键设备运行约束包括电压源换流器约束、海水淡化化设备约束、储水设备约束、制氢设备运行约束、压缩机运行约束、燃料电池运行约束、储热罐约束和储氢罐约束，该内容已有大量文献赘述，具体公式参考文献[3,17-19]。

2.5 其他约束

1) 有功功率平衡约束^[19]

$$P_t^w = P_t^L, \forall t \quad (27)$$

$$P_{b,t}^{\text{power}} = P_{i,t}^{\text{zh}} \quad (28)$$

式中: P_t^w 为 t 时刻风电的总并网功率; P_t^L 为 t 时刻期望的并网功率; $P_{b,t}^{\text{power}}$ 为 t 时刻燃料电池的电功率; $P_{i,t}^{\text{zh}}$ 为 t 时刻海上驻留人员的电负荷。

2) 氢负荷约束

$$m_H - \bar{m}_H \geq 0 \quad (29)$$

3) 热功率平衡约束

$$Q_i^{\text{hsto}} = Q_i^{\text{zh}} \quad (30)$$

式中: Q_i^{hsto} 为 t 时刻储热罐的放热功率; Q_i^{zh} 为 t 时刻海上驻留人员的热负荷。

4) 风机运行约束^[20]

$$P_{m,i,t}^{\min} \leq P_{m,i,t} \leq P_{m,i,t}^{\max} \quad (31)$$

2.6 算法求解

2.6.1 模型转化

式(2)和式(4)中存在非线性项, 可采用大 M 法进行松弛。以式(4)为例, 通过引入较大的正数 G 和布尔型变量 b 进行线性化, 具体如下

$$(1 + \kappa)F_n \geq F_m - G(1 - b) + E \quad (32)$$

$$(1 + \kappa)F_n \leq F_m + Gb \quad (33)$$

$$F_m \geq (1 - \kappa)F_n - G(1 - b) + E \quad (34)$$

$$F_m \leq (1 - \kappa)F_n + Gb \quad (35)$$

$$C_F - G(1 - b) \leq C_{Fa} \leq C_F + G(1 - b) \quad (36)$$

$$C_F + C_{FP} - Gb \leq C_{Fa} \leq C_F + C_{FP} + Gb \quad (37)$$

式中, E 为极小的正数。

2.6.2 模型求解

基于上述处理, 本文优化模型转化为混合整数线性规划模型, 可采用商业求解器进行求解。

3 算例分析

3.1 算例基础数据

本文以两个海上风电场和一个陆地负荷侧为研究对象, 其相对位置和位置编号如图 2 所示, 其中, 风电场 1 假定为位置 3, 风电场 2 假定为位置 2, 陆地侧假定为位置 1; 位置 1 与位置 2、位置 3 的距离均为 120 km, 位置 2 与位置 3 距离为 30 km。

风电场内部由 20 台容量为 10 MW 的风电机组 WT_1 — WT_{20} 组成, 10 MW 风机参数见文献[21], 风电场内部结构如附录 A 图 A1 所示。采用 Jensen 模型^[22]描述尾流效应, 风机预测最大出力如附录 A 图 A2 所示。两个海上风电场均有驻留人员, 驻留人员

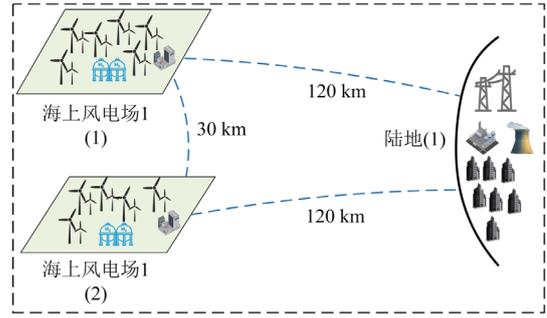


图 2 海上风电场与陆地相对位置

Fig. 2 Relative position of offshore wind farm to land

的水负荷、热负荷、电负荷如附录 A 图 A3 所示。通过评估陆地侧氢气需求, 设定船舶容量为 12 t, 近似认为船舶充氢、放氢时间为 1 h^[15]; 风电期望并网功率如附录 A 图 A4 所示, 设备的容量、效率和运维成本见附录 A 表 A1。陆地氢负荷基准值设为 16 t, 氢气售价为 70 元/kg^[15]; 假定船舶在慢速航行模式下的航速为 15 km/h, 航行耗氢量为 10 kg/h; 船舶快速航行模式下的航速为 30 km/h, 航行耗氢量为 80 kg/h。船舶初始位于陆地, 设定船舶的初始荷电状态(state of charge, SOC)为 0.11^[23]。

3.2 风电场疲劳载荷优化结果

为验证本文所提考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡策略的有效性, 设置 3 个策略进行对比, 策略 1: 考虑场间-场内疲劳载荷均衡; 策略 2: 考虑场间疲劳载荷均衡, 不考虑场内疲劳载荷均衡; 策略 3: 不考虑场间和场内疲劳和场内载荷均衡。

表 1 和表 2 分别为不同策略下风电场 1、风电场 2 内部各机组疲劳载荷情况。

由表 1 和表 2 可知, 策略 1 显著优化了机组间的疲劳载荷偏差, 将风电场 1 的最大疲劳载荷偏差降至约 0.2 MNm, 远低于策略 2 的 2.39 MNm 和策略 3 的 2.85 MNm。同样在风电场 2 中, 策略 1 也将机组间的最大疲劳偏差降至约 0.2 MNm, 相比策略 2 的 2.62 MNm 和策略 3 的 3.45 MNm 有显著降低。相较于策略 2, 策略 1 在风电场 1 的机组 WT_{19} 和风电场 2 的机组 WT_{19} 的优化效果最佳, 策略 1 分别减少了 1.214 MNm 和 1.322 MNm 疲劳载荷; 相较于策略 3, 策略 1 在风电场 1 的机组 WT_5 和风电场 2 的机组 WT_{17} 的优化效果最佳, 策略 1 分别减少了 2.144 MNm 和 2.393 MNm 疲劳载荷。

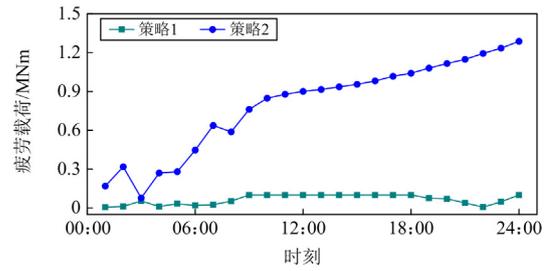
为了更好地展示策略 1 与策略 2 在机组疲劳载荷上的差异, 分别对风电场 1 和风电场 2 在疲劳载荷优化差别较大的机组 WT_{19} 进行疲劳载荷的波动性分析, 分析结果见图 3。

表 1 不同策略下风电场 1 内部各机组疲劳载荷
Table 1 Fatigue load of each unit within wind farm 1
with different strategies

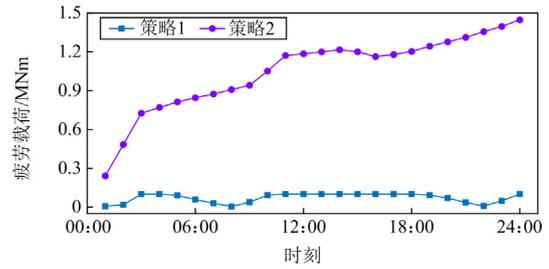
机组编号	疲劳载荷/MNm		
	策略 1	策略 2	策略 3
WT ₁	6.208 720 513 0	7.180 785 694 6	6.989 475 482 9
WT ₂	6.208 720 597 0	6.943 000 431 9	8.037 775 398 1
WT ₃	6.208 720 597 0	7.049 065 100 0	7.024 125 487 5
WT ₄	6.208 720 509 6	6.957 765 021 6	7.306 742 850 0
WT ₅	6.208 720 505 2	6.150 852 082 0	8.352 842 841 6
WT ₆	6.172 287 168 2	5.835 933 353 3	6.815 877 693 6
WT ₇	6.175 082 557 3	5.744 316 586 8	7.090 289 009 8
WT ₈	6.176 403 662 7	6.564 906 097 8	7.649 134 991 4
WT ₉	6.167 706 486 4	6.361 806 418 6	6.782 843 970 1
WT ₁₀	6.170 812 744 5	5.763 899 641 5	7.601 086 976 8
WT ₁₁	6.043 853 826 4	5.143 257 555 1	6.599 347 762 0
WT ₁₂	6.048 309 733 0	6.021 468 213 3	6.390 282 663 2
WT ₁₃	6.050 615 083 1	5.832 768 130 3	6.631 188 571 0
WT ₁₄	6.037 658 304 0	6.388 028 689 7	5.835 237 641 9
WT ₁₅	6.041 714 413 2	5.487 138 036 0	6.712 013 578 2
WT ₁₆	6.009 195 142 5	5.787 620 564 40	5.500 722 520 7
WT ₁₇	6.009 606 153 4	6.109 547 915 90	5.798 025 722 1
WT ₁₈	6.009 830 444 1	5.204 229 817 6	6.202 740 852 2
WT ₁₉	6.008 720 684 6	4.794 258 961 1	6.552 916 687 7
WT ₂₀	6.009 014 543 0	6.312 838 206 3	6.548 856 475 9
总和	122.174 413 7	121.633 486 5	136.421 527 2

表 2 不同策略下风电场 2 内部各机组疲劳载荷
Table 2 Fatigue load of each unit within wind farm 2
with different strategies

机组编号	疲劳载荷/MNm		
	策略 1	策略 2	策略 3
WT ₁	6.251 189 372 4	7.049 699 418 6	5.671 639 503 3
WT ₂	6.251 189 205 0	6.831 814 244 2	6.997 094 060 2
WT ₃	6.251 189 480 4	7.348 014 529 0	7.114 156 624 7
WT ₄	6.251 189 372 0	6.234 996 896 3	5.780 742 711 6
WT ₅	6.251 189 371 5	7.026 369 180 2	6.457 674 943 6
WT ₆	6.214 116 085 0	6.338 863 866 0	6.244 333 303 0
WT ₇	6.218 308 482 9	6.012 813 054 5	5.039 549 487 5
WT ₈	6.223 199 666 5	6.358 838 418 0	5.283 435 823 6
WT ₉	6.211 063 391 4	6.571 682 889 3	5.429 782 424 6
WT ₁₀	6.212 464 583 1	6.616 528 631 4	6.062 074 237 8
WT ₁₁	6.082 811 928 0	6.407 101 994 0	5.288 649 729 7
WT ₁₂	6.089 060 102 3	5.578 490 807 7	5.132 621 269 9
WT ₁₃	6.098 514 057 1	6.115 843 993 0	5.117 848 537 4
WT ₁₄	6.079 119 174 7	5.559 777 304 9	5.069 773 523 6
WT ₁₅	6.080 733 662 3	6.072 312 087 6	4.204 353 845 6
WT ₁₆	6.051 411 785 8	5.740 465 573 4	5.631 431 671 8
WT ₁₇	6.051 912 255 6	5.797 546 637 6	3.659 312 946 4
WT ₁₈	6.052 673 329 5	5.610 996 340 9	5.445 261 745 3
WT ₁₉	6.051 189 511 7	4.728 664 877 0	4.669 950 493 1
WT ₂₀	6.051 265 435 1	5.520 488 335 1	4.467 823 563 1
总和	123.023 790 3	123.521 309 1	108.767 510 4



(a) 风电场 1 机组的 WT₁₉ 的疲劳载荷波动图



(b) 风电场 2 机组 WT₁₉ 的疲劳载荷波动图

图 3 不同策略下机组 WT₁₉ 的疲劳载荷波动图

Fig. 3 WT₁₉ fatigue load fluctuation diagram with different strategies

由图 3(a)可知, 在 03:00 后, 策略 2 中机组 WT₁₉ 的疲劳载荷波动幅度随着时间增加而增大, 在调度结束时刻达到了 1.3 MNm 左右。相反, 在整个调度时段内, 策略 1 中机组 WT₁₉ 疲劳载荷波动幅度基本保持在 0.1 MNm 以内, 波动幅度较小。同理, 由图 3(b)分析可知, 策略 2 中机组 WT₁₉ 的疲劳载荷波动随着时间增加而增大, 策略 1 中机组 WT₁₉ 的疲劳载荷波动幅度则保持在 0.1 MNm 左右。上述结果表明, 本文所提策略能够有效减少机组的疲劳载荷波动幅度, 均衡场内疲劳载荷。

表 3 为不同策略下风电场内部疲劳载荷分析结果。由表 3 可知, 相较于策略 3, 策略 1 减少了风电场 1 约 88.19% 的疲劳载荷标准差, 策略 1 减少了风电场 2 约 90.03% 的疲劳载荷标准差。此外, 策略 1 在风电场 1 和风电场 2 的最大与最小疲劳载荷比值最小, 均为 1.033, 机组的最高维修频率是最低

表 3 不同策略下风电场内部疲劳载荷分析结果

Table 3 Analysis results of internal fatigue load in wind farm with different strategies

风电场	策略	疲劳载荷标准差	最大与最小疲劳载荷比值
1	1	0.083 840	1.033
	2	0.640 579	1.498
	3	0.709 686	1.518
2	1	0.084 250	1.033
	2	0.620 968	1.554
	3	0.845 053	1.944

维修频率的 1.033 倍, 策略 1 使得各机组的维修频率基本同步。结果表明所提策略能够均衡场内风电机组疲劳载荷。

表 4 为不同策略下风电场 1、2 疲劳载荷偏差。从表 4 可以得出, 策略 1 的疲劳载荷偏差最小, 相比策略 3, 策略 1 和策略 2 分别减少了场间约 19.58%、18.74% 的疲劳载荷偏差, 可见, 所提策略能够均衡场间疲劳载荷。

表 4 不同策略下风电场 1、2 疲劳载荷偏差

Table 4 Fatigue load deviation between wind farm 1 and wind farm 2 with different strategies

策略	风电场 1 疲劳载荷	风电场 2 疲劳载荷	偏差/%
	总和/MNm	总和/MNm	
1	122.174 413 7	123.023 790 3	0.69
2	121.633 486 5	123.521 309 1	1.53
3	136.421 527 2	108.767 510 4	20.27

综上, 本文所提策略能够均衡场间-场内风电机组疲劳载荷, 使各机组的检修时间趋于一致, 减少了检修频率, 同时也有助于风电输出的可持续性和可靠性, 保障电氢能量的可靠供应。

3.3 电氢并举的能量流灵活外送模型优化结果分析

图 4 为不同策略下船舶路线和能源消耗。

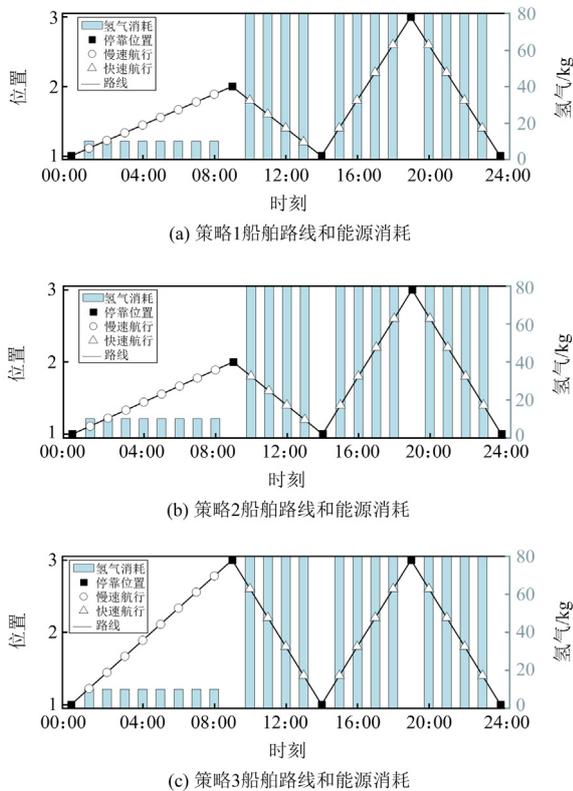


图 4 不同策略下船舶路线和能源消耗

Fig. 4 Shipping routes and energy consumption with different strategies

从图 4 可以看出, 船舶在 24 h 内安排了两次运氢计划, 分别在 00:00 和 14:00, 具体而言, 策略 1 中船舶航行路线为 1→2→1→3→1; 策略 2 中船舶航行路线为 1→2→1→3→1; 策略 3 中船舶航行路线为 1→3→1→3→1。此外, 船舶能够根据天气状况和氢气收益切换不同的航行模式, 而船舶的能源消耗是变化的, 3 种策略下船舶均在 01:00—08:00 时段内处于慢速航行模式, 对应的船舶航行耗氢量均为 10 kg/h, 船舶在陆地和风电场间的航行时间为 8 h; 在其他时段, 船舶均处于快速航行模式, 所对应的船舶航行耗氢量为 80 kg/h, 船舶在陆地和风电场间的航行时间也缩减为 4 h。其中, 在 01:00—04:00 时段, 由于受到大风天气影响, 船舶慢速航行以确保安全; 在 05:00—24:00 时段, 天气正常, 船舶也能够自适应调整航行模式, 如在 05:00—08:00 时段处于慢速航行模式, 在 09:00—24:00 时段处于快速航行模式, 在满足运氢的同时航行的经济性最优。

图 5 和图 6 分别展示了不同策略下氢气运输情况和电能传输情况。由图 5 和图 6 可知, 在整个调度周期内, 风电场 1 在 3 种策略下分别向陆地提供 9.272 t、9.272 t 和 18.81 t 氢气; 风电场 2 在 3 种策略下分别向陆地提供 9.31 t、9.312 t 和 0 t 氢气。在电能传输上, 风电场 1 在 3 种策略下分别向陆地传输 1216.75 MWh、1207.049 MWh、640.4185 MWh 电能; 风电场 2 在 3 种策略下分别向陆地传输 1236.777 MWh、1245.823 MWh、1818.076 MWh 电能。由上述结果可知, 3 种策略输送至陆地的总能量基本一致, 因为 3 种策略都是通过风机的疲劳载荷来分配风机的出力, 风电场的出力总和基本保持不变, 使得对外能量传输总和也基本一致。策略 1 和策略 2 在风电场的电能传输和氢能运输情况上基本一致, 因为策略 1 和策略 2 都充分考虑了场间疲劳载荷均衡, 场间出力相差较小, 风电场对外能量输送几乎保持一致。然而, 策略 3 与策略 1 和策略 2 在两个风电场的能量转移方面存在较大差异, 原因在于策略 3 没有考虑场间疲劳载荷均衡, 场间出力有较大差异, 因此风电场对外输出的电能和氢能

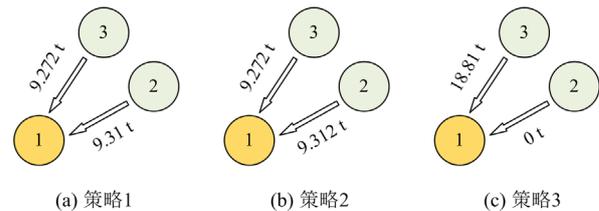


图 5 不同策略下氢气运输情况

Fig. 5 Hydrogen transportation with different strategies

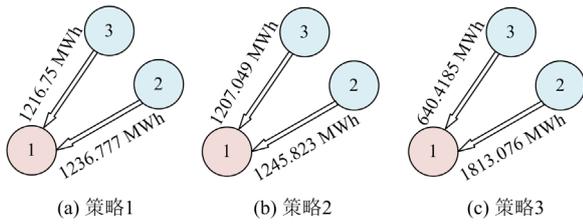


图 6 不同策略下电能传输情况

Fig. 6 Electric power transmission with different strategies

也有较大差别。

3.4 储热罐和蓄水池优化结果分析

以策略 1 为例，风电场 1 侧的储热罐热量变化情况和蓄水池变化情况分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以看出，燃料电池和储热罐实现了良好的配合，共同满足驻留人员的热负荷需求。图 8 为蓄水池水量变化情况，海水淡化装置在满足制氢耗水量的同时，满足了驻留人员的水负荷需求。此外，在调度初始时刻和调度结束时刻储热罐储热量和蓄水池水量保持相等，满足了次日的最优调度。

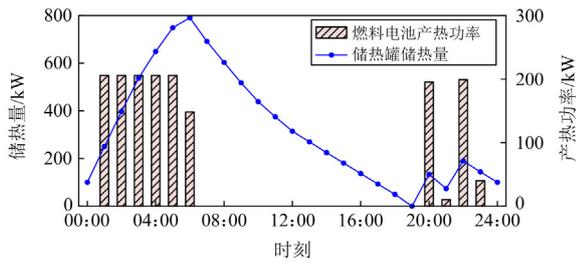


图 7 储热罐热量变化情况

Fig. 7 Heat variation conditions of thermal energy storage tank

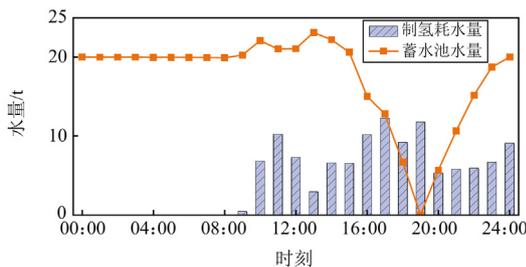


图 8 蓄水池水量变化情况

Fig. 8 Reservoir water level fluctuation conditions

3.5 经济性分析

策略 1—策略 3 的日运行总成本如表 5 所示。策略 1 在风电场检修成本上分别比策略 2、策略 3 低 12 328.767 12 元、15 753.424 66 元，从而使得策略 1 在总成本上最低。与策略 3 相比，策略 1 经济性提高了 8.11%。

表 5 日运行成本对比分析

Table 5 Comparative analysis of daily running costs

策略	风电场检修成本	总成本
1	21 917.808 22	178 452.051 2
2	34 246.575 34	190 781.688 3
3	37 671.232 88	194 204.306 9

4 结论

为了降低海上风电场维护次数频繁所带来的高昂成本，提高海上风电的消纳率，本文提出了一种考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度方法。主要结论如下所述。

1) 考虑检修便利性的场间-场内风电机组疲劳载荷均衡模型，减少了风电场 1 内约 88.19% 的疲劳载荷标准差和风电场 2 内约 90.03% 的疲劳载荷标准差，减少了场间约 19.58% 的疲劳载荷偏差，实现了场间-场内风电机组疲劳载荷均衡。

2) 与传统的调度策略相比，本文所提考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度策略提高了 8.11% 的经济性。

本文仅研究了海上风氢系统日前调度策略，在实际运行过程中可再生能源出力、负荷等可能存在预测误差，相关的实时调度策略有待进一步研究。

附录 A

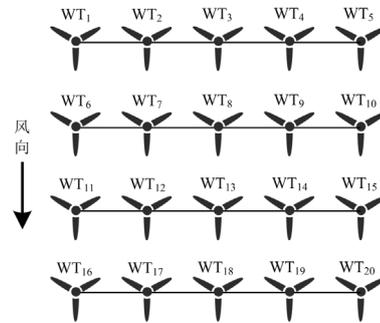


图 A1 风电场内部结构

Fig. A1 Internal structure of wind farm

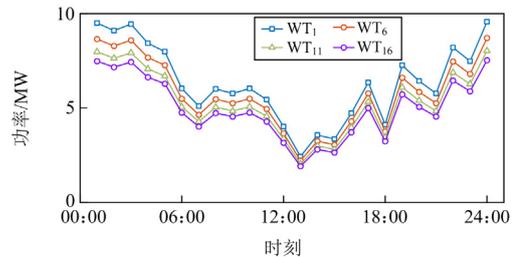


图 A2 WT₁、WT₆、WT₁₁、WT₁₆ 预测最大出力

Fig. A2 Predicted maximum output for

WT₁, WT₆, WT₁₁, and WT₁₆

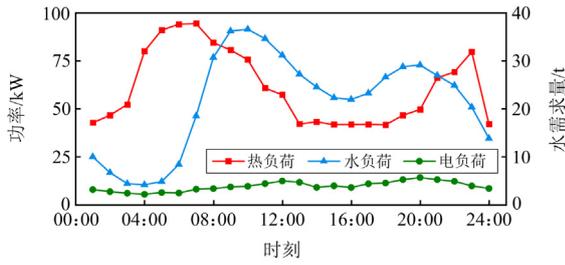


图 A3 驻留人员的热负荷、水负荷、电负荷需求

Fig. A3 Thermal load, water load, and electrical load requirements for resident personnel

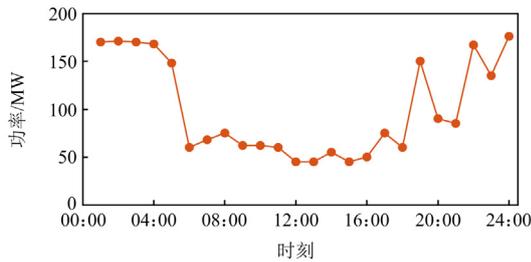


图 A4 风电期望并网功率

Fig. A4 Expected grid-connected power of wind power

表 A1 设备的容量、效率和运维成本

Table A1 Equipment capacity, efficiency and operation and maintenance costs

设备	容量/MW	效率	运维成本/(元/MWh)
风电场	200	—	4
制氢装置	80	0.9	150
淡化水装置	30	—	80
燃料电池	0.26	0.95	120
压缩机	3	0.85	40

参考文献

- [1] 张长云, 黄景光, 李振兴, 等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 108-116.
ZHANG Changyun, HUANG Jingguang, LI Zhenxing, et al. Optimal configuration of wind-hydrogen-storage hybrid microgrid capacity in polar environment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 108-116.
- [2] 全国首个“海上风电+海洋牧场+海水制氢”融合项目在广东动工[J]. 上海节能, 2022(9): 1225.
China's first "offshore wind power+sea ranch+ seawater hydrogen" fusion project in Guangdong to start construction[J]. Shanghai Energy Saving, 2022(9): 1225.
- [3] 张智泉, 陈晓杰, 符杨, 等. 含海上风电制氢的综合能源系统分布鲁棒低碳优化运行[J/OL]. 电网技术: 1-16[2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20240203.2029.011.html>.
- [4] 丰力, 张莲梅, 韦家佳, 等. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J/OL]. 中国电力: 1-14[2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231205.1633.004.html>.
- [5] FENG Li, ZHANG Lianmei, WEI Jiajia, et al. Development & thinking of offshore wind power based on life cycle economic evaluation[J/OL]. Electric Power: 1-14[2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231205.1633.004.html>.
- [6] YAO Qi, HU Yang, LUO Zhiling. Optimization of active power dispatching considering lifetime fatigue load for offshore wind farm based on multi-agent system[C]// IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 14-17, 2019, Lisbon, Portugal: 2440-2445.
- [7] LIAO Hao, HU Weihao, WU Xiawei, et al. Active power fatigue distribution[J]. Renewable Energy, 2020, 151: 1173-1185.
- [8] ZHAO Rongyong, DONG Daheng, LI Cuiling, et al. An improved power control approach for wind turbine fatigue balancing in an offshore wind farm[J]. Energies, 2020, 13(7): 1549.
- [9] 邓智文, 郭苏, 许昌, 等. 海上风电场功率提升和疲劳平衡综合优化控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 180-186.
DENG Zhiwen, GUO Su, XU Chang, et al. Comprehensive optimization control of power boost and fatigue balance for offshore wind farms[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(1): 180-186.
- [10] 景少伟, 任子旭, 魏书荣. 考虑风机疲劳载荷分布的海上风电场有功功率优化调度[J/OL]. 电源学报: 1-12[2024-03-23]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240130.1742.006>.
- [11] JING Shaowei, REN Zixu, WEI Shurong. Active power dispatch optimization for offshore wind farms considering fatigue load distribution of wind turbines[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-12[2024-03-23]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240130.1742.006>.
- [12] ZHAO Rongyong, SHEN Wenzhong, KNUDSEN T. Fatigue distribution optimization for offshore wind farms using intelligent agent control[J]. Wind Energy, 2012, 15(7): 927-944.
- [13] BAN Mingfei, BAI Wenchao, SONG Wenlong, et al.

Optimal scheduling for integrated energy-mobility systems based on renewable-to-hydrogen stations and tank truck fleets[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2666-2676.

[12] QIU Yibin, AI Yuxuan, CHEN Weirong, et al. Two-stage distributionally robust optimization-based coordinated scheduling of integrated energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-14.

[13] LIN Li, ZHENG Xinyao, GU Jia. Optimal dispatching of combined heat and power system considering the power demand elasticity of hydrogen storage active load[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2760-2770.

[14] 韩子娇, 那广宇, 董鹤楠, 等. 考虑灵活性供需平衡的含电转氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 161-169.
HAN Zijiao, NA Guangyu, DONG Henan, et al. Robust optimal operation of integrated energy system with P2H considering flexibility balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 161-169.

[15] SUI Quan, ZHANG Jingyu, SUN Le, et al. Optimal scheduling of mobile energy storage capable of variable speed energy transmission[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(3): 2710-2722.

[16] LIN Shunjiang, WANG Yaping, LIU Mingbo, et al. Stochastic optimal dispatch of PV/wind/diesel/battery microgrids using state-space approximate dynamic programming[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(15): 3409-3420.

[17] FENG Wang, TUAN L A, TJERNBERG L B, et al. A new approach for benefit evaluation of multiterminal VSC-HVDC using a proposed mixed AC/DC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 29(1): 432-443.

[18] 杜天硕, 李军徽, 葛磊蛟, 等. 计及海水淡化电制氢和热惯性的海港综合能源系统优化运行模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 143-150.
DU Tianshuo, LI Junhui, GE Leijiao, et al. Optimal operation model of seaport integrated energy system with seawater desalination for hydrogen production and thermal inertia[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 143-150.

[19] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热电优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 1-12.
CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 1-12.

[20] 寇洋, 武家辉, 张华, 等. 考虑碳捕集与 CVaR 的电力系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 131-140.
KOU Yang, WU Jiahui, ZHANG Hua, et al. Low carbon economic dispatch for a power system considering carbon capture and CVaR[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 131-140.

[21] 10 MW 海上风机参数[EB/OL]. [2024-03-28]. https://wenku.baidu.com/view/6442df7c753231126edb6f1aff00bed5b8f37351.html?_wks_=1711598527212&bdQuery=10MW%E9%A3%8E%E6%9C%BA%E5%8F%82%E6%95%B0.

[22] FENG Xiangyong, LIN Shunjiang, LIU Wanbin, et al. Distributionally robust optimal dispatch of offshore wind farm cluster connected by VSC-MTDC considering wind speed correlation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(3): 1021-1035.

[23] 随权, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 计及能量补给时刻非整的远洋海岛群微网日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5536-5547.
SUI Quan, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. A day-ahead scheduling strategy for pelagic-clustering-island microgrid with incomplete energy replenishment times[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5536-5547.

收稿日期: 2024-04-21; 修回日期: 2024-07-08

作者简介:

张磊(1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为大规模新能源接入后电力系统优化运行控制; E-mail: leizhang3188@163.com

王满康(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行与控制; E-mail: 1605859367@qq.com

随权(1995—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力系统/综合能源系统规划布局、优化调度和大停电负荷恢复。E-mail: quan_sui@163.com

(编辑 张颖)