

基于连续隐马尔可夫模型的风水火联合低碳检修优化

何知纯^{1,2,✉}, 谢敏^{1,2}, 黄莹^{1,2}, 李弋升^{1,2}, 张世平^{1,2}

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: [目的] 新型电力系统背景下, 风机的低碳检修与常规机组的协同检修等问题亟待解决。文章兼顾多属性气象因子影响和低碳性、经济性需求, 建立基于连续隐马尔可夫的风水火联合低碳检修优化模型。[方法] 首先, 以降雨量、风速、雷电危险度为观测序列, 以检修容量为隐状态序列, 利用连续隐马尔可夫(Continuous Hidden Markov Model, CHMM)过程实现对风电场检修容量的动态跟踪。然后, 以最优检修容量为决策依据、以总成本最小为优化目标, 统筹考虑检修约束、系统控制约束等, 构建风水火联合低碳检修优化模型。最后, 以IEEE30节点系统进行算例展开研究。[结果] 结果表明, 所提模型具有更显著的经济效益和低碳特性。[结论] 文章所做研究对风机的运行维护具有较高的理论价值, 工程适用性较强。

关键词: 风电运维; 连续隐马尔可夫; 风水火联合; 低碳检修; 经济效益

中图分类号: TK89; TM315

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0043-14

开放科学(资源服务)二维码:



Wind Power, Hydropower and Thermal Power Combined Low-Carbon Maintenance Optimization Based on Continuous Hidden Markov Model

HE Zhichun^{1,2,✉}, XIE Min^{1,2}, HUANG Ying^{1,2}, LI Yisheng^{1,2}, ZHANG Shiping^{1,2}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In the context of the new power system, low-carbon maintenance of wind turbines and coordinated maintenance with conventional wind turbine generator systems (WTGS) need to be solved urgently. In this paper, taking into account the impact of multi-attribute meteorological factors and low carbon and economic needs, an optimization model for wind power, hydropower and thermal power combined low-carbon maintenance based on continuous hidden Markov model is established. [Method] Firstly, dynamic tracking of wind farm maintenance capacity was realized by taking rainfall, wind speed and lightning hazard degree as the observation sequence, taking maintenance capacity as hidden state sequence, and using continuous hidden Markov model (CHMM) process. Then, an optimization model for wind power, hydropower and thermal power combined low-carbon maintenance was constructed by taking the optimal maintenance capacity as the decision-making basis, taking the minimum total cost as the optimization objective, and taking the maintenance constraints and system control constraints into consideration. Finally, took the IEEE30-node system as an example. [Result] The results show that the proposed model has more significant economic benefits and low carbon characteristics. [Conclusion] The research in this paper has high theoretical value for the operation and maintenance of WTGS, and has strong engineering applicability.

Key words: wind power operation and maintenance; continuous hidden Markov; wind power hydropower and thermal power combined; low-carbon maintenance; economic benefit

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-12-08 修回日期: 2023-02-06

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金面上项目“虚拟电厂动态聚合演化理论与计算方法研究”(2021A1515012245); 中央高校基本科研业务费重大产学研合作扶持专项“主动配电网多网多体协同优化决策技术研究”(x2dID2201280)

0 引言

双碳“战略”下,构建以新能源为主体的新型电力系统已大势所趋,风电因技术成熟、潜力巨大呈现快速发展的态势,在新能源领域占据主导地位^[1-2]。然而,复杂的设备结构和恶劣的运行环境不仅加剧风机故障,给风机的检修维护带来诸多不便,更引发系统失稳、经济受损等现象。从长远考虑,风电的检修维护问题亟待解决^[3-5]。

目前风机检修体系为“故障检修为主、状态检修和计划检修为辅”^[6-7]。故障检修又称事后检修,是发生在设备故障后的被动检修。受限于检修资源的可及性、快速恢复运行的必要性,检修事项往往流于表面,仅适用于重要性低的机组^[8]。状态检修以多源异质数据监测、故障诊断为基础,评估机组运行状态和剩余寿命。在实际应用中,受恶劣天气、监测设备性能、多部件层级式耦合的影响,机组状态特征提取困难,监测数据呈现波动剧烈、灵敏不足等特点,易引起故障定位错误、检修过剩等问题^[9-10]。计划检修站在全生命周期视角,统筹考虑机组劣化过程和历史故障规律,提前规划检修事项,被认为是最经济、最可行的检修方式^[11-12]。目前,计划检修的研究聚焦在检修策略的制定,苏青等^[13]引入有效年龄的概念,充分考虑检修次数、检修程度对机组故障演化的影响,求解风机部件的顺序维修。逯红霞等^[14]基于故障有向图理论,推演风机维护阈值函数,以最小化维护成本为目标优化检修周期。符杨等^[15]同样以维护成本为优化目标,综合考虑天气、设备劣化对检修策略的影响。符杨等^[16]借助 Copula 函数进行多部件联合风险评估,以此为纽带构建双层优化模型,探寻兼顾经济性和安全性的检修策略。IRAWAN C A 等^[17]考虑检修资源的可及性,构建风电场检修优化模型。王东^[18]将风电机组建模为串联系统,利用马尔可夫链和威尔分布描述机组寿命进程,优化检修策略。

上述研究主要存在 2 方面的问题:(1)现有研究局限于对风机内部故障演化规律的探讨,外界影响因子等对检修策略的综合影响还有待研究。作为经济调度的前提,风机的检修应在挖掘自身运行特性、气象因素的影响上,系统地实现与其他常规机组的检修协同;(2)检修维护过程忽视了低碳运行这一现实需求,对模型的优化目标考虑不充分。风机的检修引发常规机组出力增加、启停频繁等一系列现

象,造成不必要的资源浪费,合理的检修计划应促使调度过程中各类资源实现多能互补。

鉴于此,本文计及多属性气象因子(降雨量、风速、雷电危险度)对检修容量的影响,基于连续隐马尔可夫(Continuous Hidden Markov Model, CHMM)理论构建风电场检修容量跟踪模型,预估契合运行环境的检修容量。并以此为决策依据,构建风水火联合低碳检修优化模型,在兼顾系统低碳性、经济性目标的同时,实现风电与水电的协同检修优化。IEEE30 节点系统算例表明,本文所提模型的降本效益与低碳特性显著,能为风水火的联合检修维护提供有效指导。

1 基于 CHMM 的风电场检修容量跟踪模型

相较于水火电机组,风机的运行环境较为恶劣。大量调研表明^[19-21],气象因素成为机组故障与检修的重要诱因,其中降雨量、风速、雷电危险度占据主导地位。本节以风电场为研究对象,以降雨量、风速、雷电危险度为多属性气象因子,引入 CHMM 理论,跟踪求解多属性气象因子波动下的风电场检修容量。

1.1 连续隐马尔可夫模型

CHMM 经马尔可夫发展而来,它以两个关联的马尔可夫随机过程表征隐状态序列(不可观测)与观测序列的联系^[22-23]。其中,马尔科夫链描述隐状态的变化,随机过程则描述两序列映射关系的概率分布,观测序列的概率密度函数通常以高斯混合模型表示^[24]。

风电场检修容量无法直接观测得到,但可以通过分析多属性气象因子(降雨量、风速、雷电危险度)的时变过程来间接获得,且多属性气象因子与检修容量之间存在复杂的统计关系。据此,本文将风电场检修容量跟踪问题映射为 CHMM。隐状态序列(以天为时间尺度,下同)为检修容量的连续时变过程,观测序列为时变过程内获取的多属性气象因子数值。

风电场检修容量的 CHMM 由一个五元组 $\lambda = (N, M, \pi, A, B)$ 描述^[25],具体如下。

1)隐状态数目 N 。记隐状态集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$,观测序列 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$,则 t 时刻所处状态 $q_t \in S$ 。本文认为风电场检修事项中,每个状态为特定检修容量区间。根据历史检修数据、恶劣天气设定标准等进行风电场检修容量的区间划分^[26-28],设定 5 种隐状态,即 $N=5$,其定义如表 1 所示。

表1 各隐状态物理含义

Tab. 1 Physical meaning of each hidden state

状态	检修容量	物理含义
1	$(0.00 \sim 0.50)P_{\max,w}$	少部分机组需要检修
2	$(0.50 \sim 0.75)P_{\max,w}$	—
3	$(0.75 \sim 0.90)P_{\max,w}$	大部分机组需要检修
4	$(0.90 \sim 0.95)P_{\max,w}$	—
5	$(0.95 \sim 1.00)P_{\max,w}$	几乎所有的机组需要检修

2) 观测值数目 M : 每个隐状态对应的高斯混合数。记观测值集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$, 则 t 时刻观测值 $o_t \in V$, 观测序列 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ 。本文以相互关联的降雨量序列、风速序列、雷电危险度序列作为观测序列, 采用3个高斯分布的线性组合无限逼近, 即 $M=3$ 。

3) 初始状态概率矩阵 π 。 π 表示初始 $t=1$ 时的概率矩阵, $\pi = \{\pi_i\}$, 其中 π_i 描述状态 q_1 为 S_i 的概率, 即:

$$\pi_i = P(q_1 = S_i) \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

4) 状态转移概率矩阵 A 。 A 描述从状态 $S_i(t$ 时刻) 转移到状态 $S_j(t+1$ 时刻) 的概率, 即 $A = (a_{ij})_{N \times N}$:

$$a_{ij} = P(q_{t+1} = S_j | q_t = S_i), \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (2)$$

5) 观测概率矩阵 B 。 CHMM 采用高斯混合模型拟合各隐状态对应的观测值的概率密度函数, 即:

$$b_j(o_t) = \sum_{m=1}^M w_{j,m} b_{j,m}(o_t) = \sum_{m=1}^M w_{j,m} G\left(o_t, \mu_{j,m}, \sum_{j,m}\right) \quad (3)$$

式中:

M —— 高斯分量个数;

$w_{j,m}$ 、 $\mu_{j,m}$ 、 $\sum_{j,m}$ —— 状态 S_j 下第 m 个高斯分布的权值、均值向量、方差矩阵;

$G(o_t, \mu_{j,m}, \sum_{j,m})$ —— 混合高斯概率密度函数。 状态 j 下的第 m 个高斯分布 $b_{j,m}(o_t)$ 为:

$$b_{j,m}(o_t) = G(o_t, \mu_{j,m}, \sum_{j,m}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^D \left| \sum_{j,m} \right|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(o_t - \mu_{j,m})^T \sum_{j,m}^{-1} (o_t - \mu_{j,m})\right) \quad (4)$$

权重 $w_{j,m}$ 受以下约束限制:

$$w_{j,m} > 0, \quad \sum_{m=1}^M w_{j,m} = 1, \quad 1 \leq j \leq N, \quad 1 \leq m \leq M_j \quad (5)$$

鉴于五元组各参数联系紧密, 参数 B 可等效为:

$B \rightarrow (w, \mu, \sum)$, 五元组 λ 可等效为: $\lambda \rightarrow (\pi, A, w, \mu, \sum)$ 。

1.2 CHMM 的训练

CHMM 的训练本质是参数学习问题, 即通过循环迭代求解最优参数 $\lambda = (\pi, A, w, \mu, \sum)$, 使得 $P(O|\lambda)$ 最大。 本文以历史观测序列 O 为训练数据, 估计最优参数 λ 步骤如下:

1) 基于 O , 采用 Baum-Welch 算法评估参数 (第 k 次循环时求解)。

2) 采用 Viterbi 算法计算参数 $\hat{\lambda}_k$ 下的 $\hat{P}(O|\hat{\lambda}_k)$ 。

3) 判断收敛条件 $|\hat{P}(O|\hat{\lambda}_k) - \hat{P}(O|\hat{\lambda}_{k-1})| < \delta$ (δ 为设定阈值) 是否成立; 若成立, 将当前求解的 $\hat{\lambda}_k$ 作为最优参数 λ ; 若不成立, 重复前两步, 直至收敛。

1.3 风电场检修容量的确定

风电场检修容量的确定可视为解码问题, 即在给定观测序列 O' 和最优参数 λ (1.2 节得到) 的基础上, 采用 Viterbi 算法求解最贴合观测序列时变特性的隐状态序列。 其核心思想如下:

假定在最优参数和观测序列下, q_t 描述 $P(q_t = S_i | O', \lambda)$ 达最大时的 t 时刻状态, $q_{1:T}$ 描述 $P(q_T = S_i | O', \lambda)$ 达最大时的状态序列, 即:

$$q_t = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [P(q_t = S_i | O', \lambda)] \quad (6)$$

$$q_{1:T} = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [P(q_T = S_i | O', \lambda)] \quad (7)$$

$$P(q_T = S_i | O', \lambda) = \frac{P(O', q_T = S_i | \lambda)}{P(O' | \lambda)} \quad (8)$$

求解隐状态序列 Q' 即得到了风电场的日检修容量区间, 依据风电场的运行特点与历史检修维护数据^[29-30], 求解此区间内的日检修容量值 $\beta'_w(t)$ 。 即日检修容量值的确定分两步进行: (1) 计及多属性气象因子构建 CHMM 模型, 求解式(7)、式(8)得到隐状态 (即风电场待检修的容量区间); (2) 依据风电场的检修特性等, 从式(7)、式(8)求解的容量区间内选取具体的检修容量值。 两步骤的逻辑关系如图1所示, 具体公式表述如下:

$$\beta'_w(t) = \gamma_t P_{\max,w} \quad (9)$$

式中:

γ_t —— t 时刻隐状态所系区间内的随机系数 (抽样法得到), 描述风电场检修容量占比, 假定 t 时刻隐状态为 s_t , 则 $\gamma_t \in (0 \sim 0.5)$;

$P_{\max,w}$ —— 风电场 w 的最大出力。

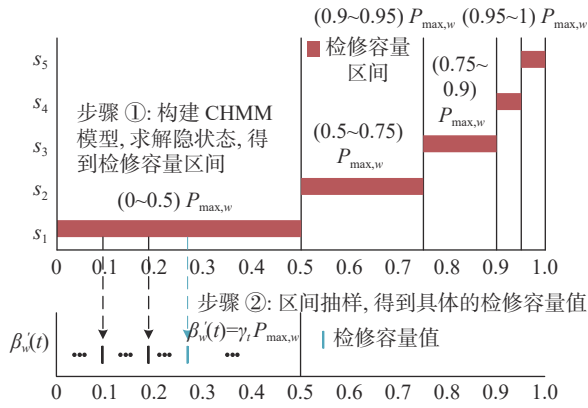


图 1 风电场日检修容量值的确定步骤

Fig. 1 Steps to determine the daily maintenance capacity of wind farm

1.4 模型流程

基于 CHMM 的风电场检修容量跟踪模型的整体流程如图 2 所示。

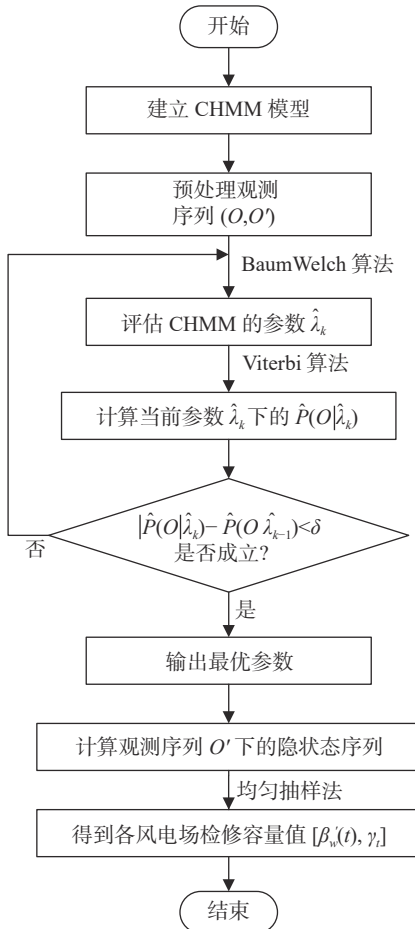


图 2 基于 CHMM 的风电场检修容量跟踪模型的流程

Fig. 2 Flow chart of wind farm maintenance capacity tracking model based on CHMM

2 风水火联合低碳检修优化模型

2.1 模型假设

依据风机检修维护存在极易受外界因素影响、故障频繁、即坏即检等特点，基于简化模型的原则，设定如下假设：

1) 考虑到同一地区下各风机类似的系统特性和外部气象特性，风电与水火电机组共同参与检修优化。

2) 为确保多属性气象因子的时效性和精准性，根据天气预报分类原则，以月度为检修规划周期，以天为时间尺度。

3) 通常风机检修维护周期较短，参考文献，本文设定风机检修工期为 3 d。

4) 在检修工期内，某一风电场检修容量值须为固定值，本文取检修区间内的最小值，具体见式(17)。

2.2 优化目标

本文在构建模型时以最小化经济损失、助力电力系统低碳运行为目标，统筹考虑机组检修成本、运行成本、碳排放成本等目标。以下采用各子目标(成本)加权求和的方式构建种优化目标，其中各项权重系数可以体系对该项成本值的惩罚强度^[31-33]。

构建总优化目标：

$$\min F = \min(\omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 + \omega_3 F_3) \quad (10)$$

机组检修成本 F_1 表示为：

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^Z C_{jx,Z,t} P_{\max,i} a_i(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W C_{jx,w,t} \beta_w(t) \quad (11)$$

机组运行成本 F_2 表示为：

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{T_h} [c_{0,i} P_i(t)^2 + c_{1,i} P_i(t) + c_{2,i} (1 - a_i(t))] \quad (12)$$

碳排放成本 F_3 表示为：

$$F_3 = \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{T_h} P_i(t) \delta_i \quad (13)$$

式中：

T ——检修时段(本文以月为检修周期， $T=30$)；

i ——机组编号；

Z ——水火电机组总数， $Z=T_h+T_m$ (T_h 、 T_m 分别为火电机组数目、水电机组数目)；

W ——风电场总数；

$C_{jx,Z,t}$ 、 $C_{jx,w,t}$ ——单位容量水火电机组、风机的检修费用, 受实际情况下人力物力资源的限制, 该项费用月内随时间变化, 人力物力资源缺乏时, 其值较高;

$P_{\max,i}$ ——水火电机组的最大出力;

$a_i(t)$ ——机组 i 的检修 0~1 变量, $a_i(t) = 1$ 表示 t 时刻机组 i 处于检修状态, $a_i(t) = 0$ 表示 t 时刻机组 i 处于非检修状态;

$\beta_w(t)$ ——风电场 w 的检修连续变量, $\beta_w(t)$ 值反映风电场中实际需要检修的容量值;

$P_i(t)$ ——火电机组 i 在 t 时刻的出力;

$c_{0,i}$ 、 $c_{1,i}$ 、 $c_{2,i}$ ——火电机组的煤耗系数。

根据文献^[34-35], λ 为度电碳成本, 取值为 0.019 元/kWh; δ_t 为时间间隔, 即每天的小时数(本文检修模型以天为尺度), 取 24 h; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为机组检修成本、运行成本、碳排放成本的权值, 根据实际系统的碳惩罚需求而设定。

2.3 约束条件

优化过程考虑机组检修约束、机组特性约束、系统运行控制约束等^[36-38], 为风水火联合系统制定合理的检修优化策略^[39]。

2.3.1 水火电机组检修约束

1) 水火电机组检修持续性约束

$$a_i(t) = \begin{cases} 0, & t \notin [t'_{\text{sta},i}, t'_{\text{end},i}] \\ 1, & t \in [t'_{\text{sta},i}, t'_{\text{end},i}] \end{cases} \quad (14)$$

式中:

$t'_{\text{sta},i}$ 、 $t'_{\text{end},i}$ ——机组 i 实际检修计划的开始时间和终止时间。

2) 水火电机组工期约束

$$\sum_{t=1}^T a_i(t) = T_{\text{cx},i} \quad (15)$$

式中:

$T_{\text{cx},i}$ ——机组 i 的检修工期。

2.3.2 风电场检修约束

1) 检修容量平衡方程

风电场的实际检修容量由检修 0~1 变量和预测检修容量决定, 即系统地兼顾模型优化过程与外界多属性气象因子的共同作用。

$$\beta_w(t) = \beta'_w(t) \cdot b_w(t) \quad (16)$$

式中:

$\beta'_w(t)$ —— t 时刻风电场 w 的预测检修容量, 经第 1 节模型求得, 即所述 CHMM 的隐状态对应值(式 9);

$b_w(t)$ ——风电场检修 0~1 变量; $b_w(t) = 1$ 表示 t 时刻风电场 w 处于检修状态, $b_w(t) = 0$ 表示 t 时刻风电场 w 处于非检修状态。

2) 检修容量一致性约束

依据 2.1 节所述假设 4, 在优化得到的检修区间内, 检修容量应保持固定且为区间最小值:

$$\beta_w(t'_{\text{sta},w}) = \beta_w(t'_{\text{sta},w} + 1) = \beta_w(t'_{\text{end},w}) \\ = \min \{ \beta_w(t'_{\text{sta},w}), \beta_w(t'_{\text{sta},w} + 1), \beta_w(t'_{\text{end},w}) \} \quad (17)$$

式中:

$t'_{\text{sta},w}$ 、 $t'_{\text{end},w}$ ——风电场 w 实际检修计划的开始时间和终止时间。

3) 检修持续性约束

$$b_w(t) = \begin{cases} 0, & t \notin [t'_{\text{sta},w}, t'_{\text{end},w}] \\ 1, & t \in [t'_{\text{sta},w}, t'_{\text{end},w}] \end{cases} \quad (18)$$

4) 检修工期约束

$$\sum_{t=1}^T b_w(t) = T_{\text{cx},w} \quad (19)$$

式中:

$T_{\text{cx},w}$ ——风电场 w 的检修工期, 根据假设 3, $T_{\text{cx},w} = 3$ 。

2.3.3 机组特性约束

1) 火电机组功率上下限约束

$$[1 - a_i(t)]P_{i,\min} \leq P_i(t) \leq [1 - a_i(t)]P_{i,\max} \quad (20)$$

式中:

$P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ ($i \in \Omega_{T_n}$) ——火电机组 i 的最小技术出力、最大技术出力。

2) 水电机组功率上下限约束

$$0 \leq P_i(t) \leq [1 - a_i(t)]P_{i,\max} \quad (21)$$

式中:

$P_{i,\max}$ ($i \in \Omega_{T_m}$) ——水电机组 i 的最大技术出力。

3) 风电场功率约束

$$P_w(t) = P'_w(t) \cdot [1 - \gamma_t b_w(t)] \quad (22)$$

式中:

$P_w(t)$ 、 $P'_w(t)$ ——风电场 w 的调度出力、预测出力;

γ_t ——风电场检修容量占比, 由第 1 节模型求得(式 9)。

2.3.4 系统运行控制约束

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^Z P_i(t) + \sum_{w=1}^W P_w(t) \pm \sum_{h=1}^H P_h(t) = D_t \quad (23)$$

式中:

$P_h(t)$ —— t 时刻外区域与本区域电网的交换功率;

H —— 联络线总数;

D_t —— 本区域的日最大负荷, 为系统总负荷值。

2) 系统备用约束

国内外学者在机组检修优化问题中很少详细考虑失负荷量, 通常将失负荷量的考虑计入系统备用约束中^[40-42], 即:

$$\sum_{i=1}^Z P_{i,\max} - \sum_{i=1}^Z P_{i,\max} a_i(t) - (1 + \theta) D_t \geq 0 \quad (24)$$

式中:

θ —— 依据系统运行特点设定的最佳备用系数,

本文取 $\theta = 0.05$ 。

3) 系统潮流约束

$$-P_{l,\max} \leq \sum_{i \in L} [P_i(t) + P_w(t) + P_h(t) - D_t] \leq P_{l,\max} \quad (25)$$

式中:

$P_{l,\max}$ —— 输电线路 l 的最大传输功率;

L —— 线路总数。

2.4 求解算法

将第 1 节求出的风电场检修容量参数 $[\beta'_w(t), \gamma_t]$ 作为优化模型的边界条件, 受制于同一检修工期内风电场的检修容量一致, 即假设 4 和式 (17) 必须满足的要求下, 本文迭代求解模型, 求解流程如图 3 所示。具体步骤如下:

1) 将 $[\beta'_w(t), \gamma_t]$ 作为初始边界条件, 求解风水火联合低碳检修优化模型, 得到风电场初始检修计划 $b_w(t)$ 。

2) 按照式 (17) 修改检修工期 ($t'_{\text{sta},w}, t'_{\text{end},w}$) 内的 $\beta'_w(t)$ 、 γ_t 值, 动态调整初始边界条件 $[\beta'_w(t), \gamma_t]^k$ (第 k 次调整)。

3) 以调整后的 $[\beta'_w(t), \gamma_t]^k$ 为边界条件循环求解优化模型, 重复两阶段步骤, 直至 $b_w(t)^k = b_w(t)^{k-1}$ ($k \geq 2$)。

3 算例分析

3.1 基于 CHMM 的风电场检修容量跟踪求解结果

3.1.1 数据预处理

基于模型特性和时效性拆分观测序列, 以过去两年的数据为训练集, 以未来一个月的数据为预测

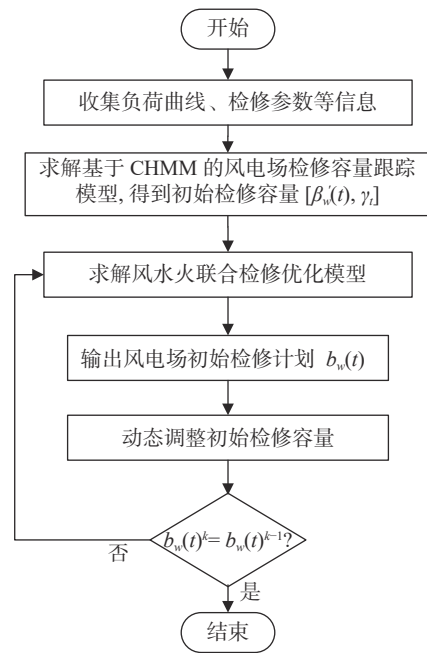


图 3 风水火联合低碳检修优化模型的求解步骤

Fig. 3 Solving steps of the optimization model for wind power, hydropower and thermal power combined low-carbon maintenance

集。原始观测序列包含降雨量、风速、雷电危险度 3 个维度, 前 2 个维度可由气象机构直接监测得到, 雷电危险度受所在片区的气象数据、雷电天气强度和风机特性共同作用, 设定原则参考文献^[28]。原始观测序列数据集形式如表 2 所示。

表 2 观测序列数据集形式

Tab. 2 Observation sequence data set form

日期	降雨量/mm	风速/(m·s ⁻¹)	雷电危险度
D38	15	1.68	0.3
D39	167	9.71	0.5
.....

3.1.2 CHMM 训练结果

经 CHMM 训练, 采用 Baum-Welch 算法求解模型参数 λ 如表 3~表 5 所示。

表 3 初始状态概率矩阵 π

Tab. 3 Initial state probability matrix π

初始概率	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
π	1	0	0	0	0

3.1.3 检修容量求解结果

将 3.1.2 节求出的参数作为 CHMM 的最优参数 λ , 采用 Viterbi 算法求解未来一个月与观测序列关

表 4 状态转移概率矩阵 A

Tab. 4 State transition probability matrix A

隐状态	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
s_1	0.263 0	0.483 9	0.161 9	0.035 0	0.056 2
s_2	0.385 7	0.261 3	0.205 0	0.039 0	0.109 1
s_3	0.301 9	0.122 5	0.373 2	0.177 1	0.025 3
s_4	0.263 6	0.000 0	0.139 9	0.458 0	0.138 5
s_5	0.211 0	0.156 2	0.288 5	0.055 6	0.288 7

表 5 隐状态概率矩阵 B

Tab. 5 Hidden state probability matrix B

日期	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
D1	0.791 624 7	0.207 005 4	0.001 272 4	0.000 086 1	0.000 011 3
D2	0.038 939 9	0.960 987 4	0.000 016 6	0.000 052 3	0.000 003 8
D3	0.001 347 6	0.998 619 9	0.000 000 4	0.000 031 2	0.000 000 9
D4	0.791 687 4	0.203 395 1	0.004 805 6	0.000 099 1	0.000 012 7
D5	0.785 881 3	0.212 917 9	0.001 102 6	0.000 086 8	0.000 011 4
.....

联的最优隐状态序列, 最优观测值-隐状态分布如图 4 所示, 结果如表 6 所示。

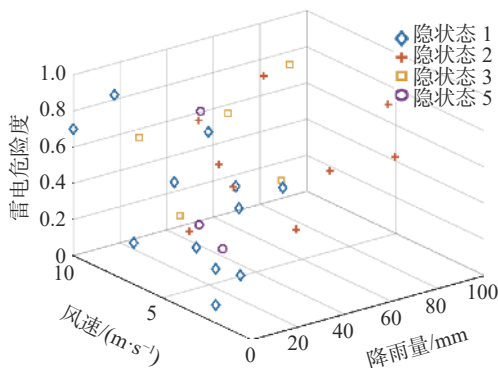


图 4 最优观测值-隐状态分布

Fig. 4 Hidden state distribution of optimal observation value

表 6 未来一月的最优隐状态序列

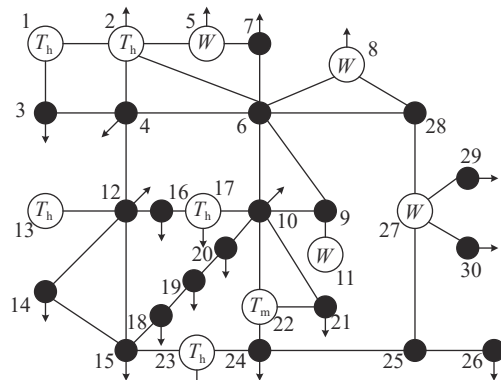
Tab. 6 Optimal hidden state sequence for the next month

隐状态	天数/d	天数占比/%
1	12	40.0
2	10	33.3
3	5	16.7
4	0	0.0
5	3	10.0

由上述图表可知, 未来一个月内, 检修容量处于隐状态 1 的天数最多, 占比 40%, 大都分布在降雨量和雷电危险度较低的时刻, 此时外界天气状况尚佳, 有少部分(0%~50%)机组需要安排检修。处于隐状态 4、隐状态 5 的天数较少, 占比 10%, 即实际运行中安排 90% 以上机组检修的情况极为罕见, 这与有限的检修资源(人力、预算等)、亟待满足的负荷需求密切相关。同时, 隐状态 2、隐状态 3 出现的频数高于隐状态 5, 且相应的天气状况整体更为恶劣, 这是因为极其严峻的外部气象环境在加剧机组的损害, 同时也给检修维护工作带来了极大的不便, 此时, 安排检修的机组比例相对更低。经 CHMM 求出的风电场检修容量充分考虑了外界气象因素对检修容量的影响, 为风电场参与系统整体检修优化提供有利参照。

3.2 风水火联合低碳检修优化结果

本文通过 IEEE30 节点系统算例验证模型(ω_1 、 ω_2 、 ω_3 均取为 1), 系统包含 30 个节点、6 台常规水火机组、41 条线路, 在 5、8、11、27 节点接有 4 座风场。系统拓扑图如图 5 所示(W 为风电, T_h 为火电, T_m 为水电), 4 座风电场的预测功率曲线如图 6 所示, 日负荷预测曲线如图 7 所示, 以 BPA 运行数据中各节点负荷数据为基础, 等分配总负荷得到各节点负荷, 各机组特性参数和检修工期如表 7 所示, 水火机组/风电场单位容量的检修费用曲线如图 8 所示。所采用的计算机为 Inter(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz(8 CPUs)。



注: 单位为 d。

图 5 IEEE30 节点系统拓扑图

Fig. 5 IEEE 30-node system topology diagram

3.2.1 检修优化结果分析

经 GAMS 仿真计算, 规划周期内优化的各风电场检修安排如表 8 所示, 各机组检修优化决策结果

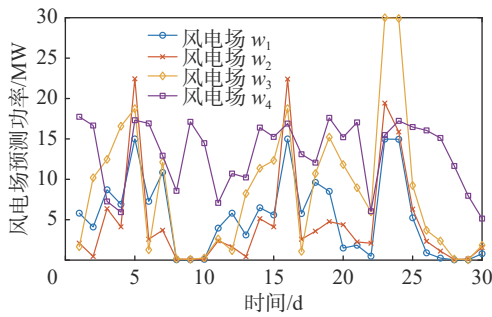


图 6 风电场预测功率曲线

Fig. 6 Forecast power of wind farm

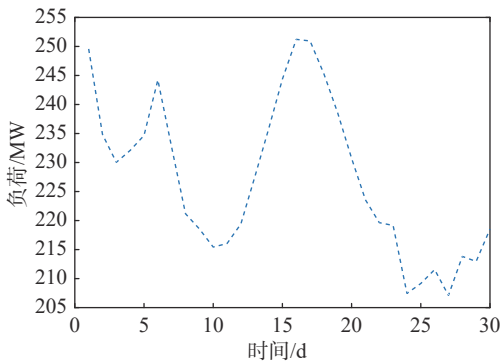


图 7 风电场日负荷预测曲线

Fig. 7 Daily load forecasting curve of wind farm

表 7 各机组特性参数和检修工期

Tab. 7 Characteristic parameters and maintenance duration of each WTGS

机组	$P_{i,max}/$ MW	$P_{i,min}/$ MW	$c_2/$ (元·MW ⁻¹)	$c_1/$ (元·MW ⁻¹)	$c_0/$ (元·MW ⁻¹)	检修工期/ d
i_1	80.0	0	0.140 0	14.00	0	10
i_2	80.0	0	0.121 7	12.17	0	7
i_3	50.0	0	—	—	—	4
i_4	55.0	0	0.058 0	22.60	0	5
i_5	30.0	0	0.173 9	20.86	0	3
i_6	40.0	0	0.173 9	20.86	0	4
w_1	15.0	0	—	—	—	3
w_2	22.5	0	—	—	—	3
w_3	30.0	0	—	—	—	3
w_4	30.0	0	—	—	—	3

如图 9 所示。

由上述图表可知,风电场大都安排在月末检修,此时段处于负荷低谷期、单位容量检修费用较低时段,此检修安排兼顾系统运行稳定性与经济性。大部分水火电机组的检修安排在中下旬($D_{15}\sim D_{25}$),此时段负荷需求呈现大幅度下降的趋势,如此可保证

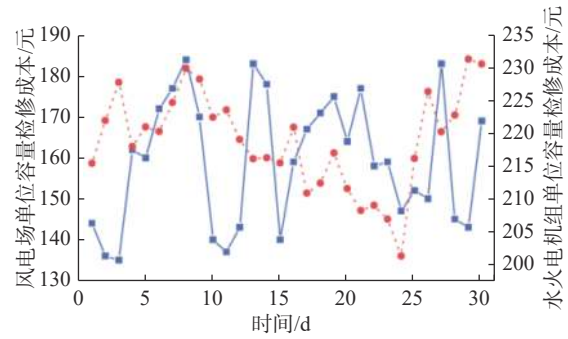


图 8 水火电/风电场单位容量的检修费用曲线

Fig. 8 Maintenance cost curve of unit capacity of hydropower station, thermal power station/wind farm

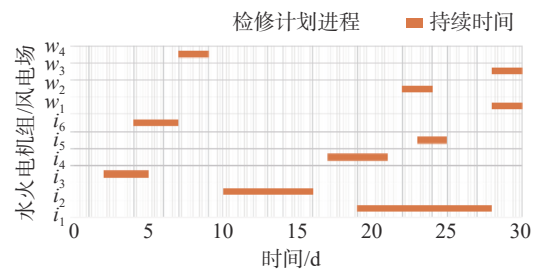


图 9 规划期内各机组检修计划

Fig. 9 Maintenance plan of each WTGS in the planning period

表 8 规划周期内各风电场检修安排

Tab. 8 Maintenance arrangement of each wind farm within the planning period

风电场	开始时间/d	持续时间/d	结束时间/d	检修容量/MW
w_1	28	3	30	6.0
w_2	22	3	25	13.5
w_3	28	3	20	16.5
w_4	7	3	9	22.5

负荷高峰期内大部分机组处于持续运行状态,满足系统备用需求。整个规划周期内,实现了风火水的协同检修、错峰检修,保障了机组出力平稳,有力地促进系统“等备用运行”。

检修优化过程中,系统的水火电出力、风电出力随时间的变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,水火电出力曲线与负荷曲线的变化趋势较为相近,负荷高峰期即水火电机组出力充裕时期。 D_5 、 D_{15} 、 D_{24} 前后,受限于部分水火电机组的检修,呈现水火电出力欠缺、风电出力充足的运行特性。月末,风电场内部分机组需要检修,风电出力不足,此时段负荷需求几乎由水火电供给。整体上,各机组出力变化特性反映了优化模型对机组检修和

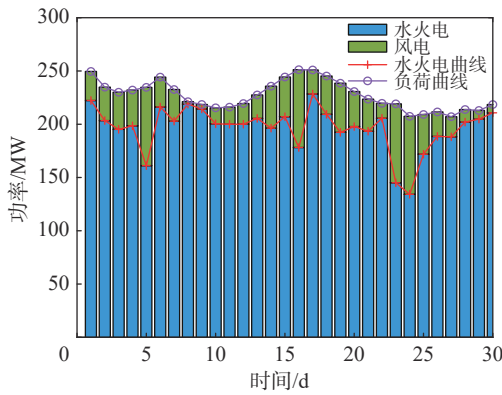


图 10 各类型机组出力变化
Fig. 10 Output change of each type of WTGS

系统运行的有效协同。

具体地,各风电场的出力曲线如图 11 所示,差值部分表征检修引起的出力缺额,各缺额时段对应检修区间。 w_1 、 w_3 检修工期内风电出力较低,出力缺额较少,检修对整个风电场出力的影响较小; w_4 检修工期内出力较高、检修容量最大,此时出力缺额最多,检修对出力的影响最为显著。综合分析,检修计划的优化充分考虑了风电场出力特性,符合将检修安排在出力低谷时段这一现实要求。

3.2.2 经济效益分析

整个优化过程中,各成本变化曲线如图 12 所示。运行成本与火电出力紧密相关,两曲线呈现相同的

变化趋势。 $D_{19} \sim D_{22}$ 内检修成本曲线处于峰部,分析可知,此时容量较大的机组 i_1 和 i_4 处于检修状态。碳排放成本曲线较为平滑缓和,表明规划期内火电机组出力保持平稳。

文献 [43] 模型在检修优化时忽略了对低碳的要求,为方便阐述,称文献 [43] 模型为“对照模型”。为验证本文模型的优越性,应用本文算例求解两模型,两模型求解检修区间对比图如图 13 所示,得到的各项子结果如表 9 所示。

由表 9 可知,相比于对照模型,优化模型在目标函数中考虑了碳排放成本,求解得到的水火电出力、和碳排放成本均降低 0.14%,运行成本降低 15.8%,而风电出力增加 0.9%,表明优化模型以促进风电出力来平抑水火电出力变化的影响。优化模型求解的检修区间内风机出力较小,有利于风电消纳、降低水火电出力,但此时段单位检修容量成本和检修容量值均更高(见图 8),故总检修成本有所增加,由于优化模型优化的是 3 个子目标的加权求和,系统总成本降低 0.05%,增加的检修成本得到有效补偿,表明优化模型以牺牲检修成本满足对经济效益的追求。对比各项指标,优化模型在改善风电出力、助力低碳、降低成本方面整体上优于对照模型,即优化模型在合理安排检修计划的同时,实现了系统的低碳、经济运行,为“双碳”战略下水火火的联合低碳检修优化提供有力支撑。

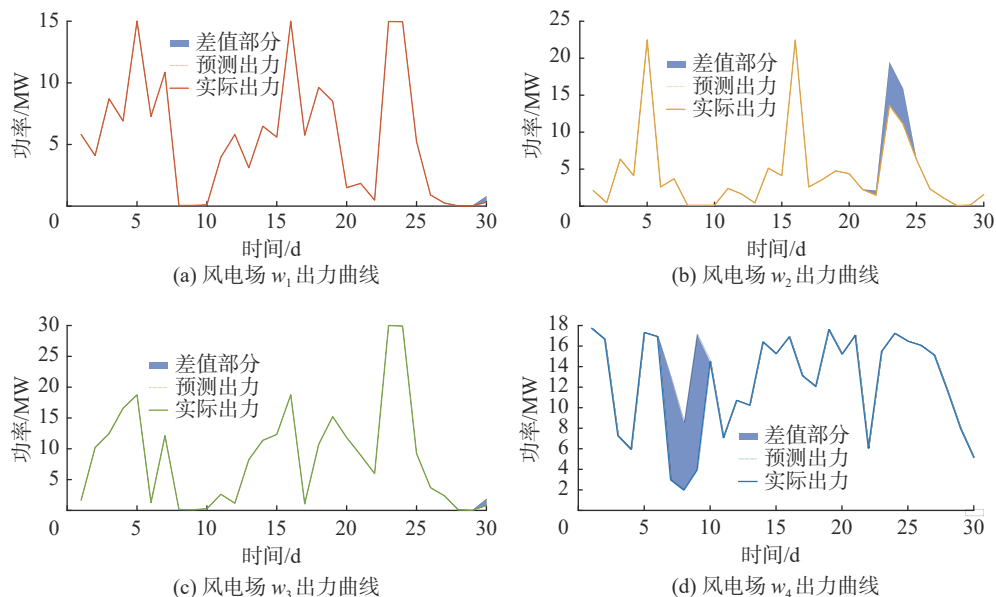


图 11 各风电场的出力曲线
Fig. 11 Output curve of each wind farm

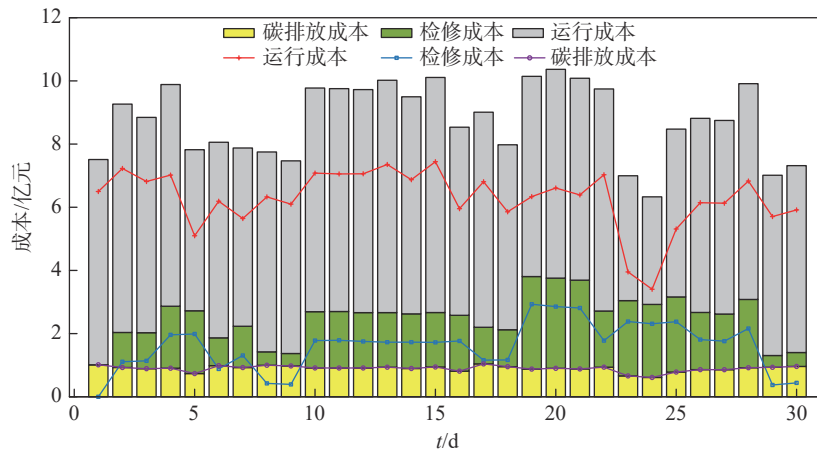


图 12 优化过程中各成本变化曲线

Fig. 12 Cost change curves in the optimization process

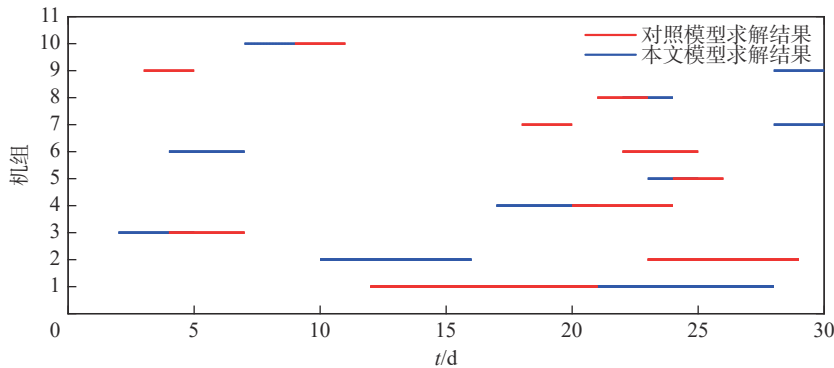


图 13 两模型求解检修区间对比图

Fig. 13 Comparison diagram of maintenance interval solved by two models

表 9 不同模型求解结果对比

Tab. 9 Comparison of solution results of different models

参数	优化模型	对照模型	对比
总成本/元	2 628 384	2 629 746	-0.05%
碳排放成本/元	268 731.3	269 106	-0.14%
运行成本/元	1 881 674	1 892 588	-0.58%
检修成本/元	477 979	468 052.1	2.12%
水火电检修成本/元	450 653.2	447 661.8	0.67%
风电检修成本/元	27 325.8	20 390.33	34.01%
水火电出力/MW	5 893.229	5 901.448	-0.14%
风电出力/MW	922.654 2	914.435 9	0.90%

4 结论

本文计及多属性气象因子,建立基于 CHMM 的风电场检修容量跟踪模型。以跟踪模型求解结果为边界,以低碳、经济运行作为优化目标,统筹考虑机组

运行特性、检修控制约束等,建立风水火联合低碳检修优化模型,通过 IEEE30 节点系统进行验证,得到以下结论:

1) 本文充分计及多属性气象因子对风机检修的影响,制定合理的检修容量配置方案,为优化模型提供契合现实的数据。

2) 本文兼顾多属性气象因子和系统运行优化的共同作用,风电场的检修大都被安排在出力低谷期,有力地促进了风电消纳。

3) 本文模型综合考虑系统运行特性和低碳目标,实现了风水火协同检修、错峰检修,有效平抑机组出力波动性,助力系统平稳运行。

4) 与对照模型相比,本文模型的优化程度更佳,更好地实现了“双碳”目标下的低碳检修和经济运行。

但本文也存在一些不足,受制于系统内风机性能、算例规模,模型的优化空间有限,下一步将完善

模型,计及多类型电源,实现多场景下的机组联合低碳检修优化。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].*中国电机工程学报*,2022,42(8):2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
- [2] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].*中国工程科学*,2021,23(6):1-14. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.001.
SHU Y B, ZHANG L Y, ZHANG Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. *Strategic study of CAE*, 2021, 23(6): 1-14. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.001.
- [3] 葛畅,阎洁,刘永前,等.海上风电场运行控制维护关键技术综述[J].*中国电机工程学报*,2022,42(12):4278-4291. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220637.
GE C, YAN J, LIU Y Q, et al. Review of key technologies for operation control and maintenance of offshore wind farm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12): 4278-4291. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220637.
- [4] 官嫣嫣,庄佳才.基于风险管理的海上风电进度管理方法研究[J].*南方能源建设*,2022,9(1):34-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005.
GUAN Y Y, ZHUANG J C. Research on schedule management method of offshore wind power based on risk management [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 34-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005.
- [5] 田帅.新能源风险投资全周期风险管理体系的构建[J].*南方能源建设*,2022,9(1):40-46. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.006.
TIAN S. Construction of the whole cycle risk management system of new energy venture capital [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 40-46. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.006.
- [6] 晁化伟.计及恶劣天气影响的海上风电场可靠性评估与维修/维护资源优化[D].重庆:重庆大学,2019. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.002117.
CHAO H W. Offshore wind farms reliability evaluation and repair/maintenance resources optimization considering severe weather conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.002117.
- [7] 马广璐.风电机组机会维修策略研究[D].北京:华北电力大学(北京),2021. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000562.
MA G L. Research on opportunity maintenance strategy of wind turbine [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000562.
- [8] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等.海上风电机组运行维护现状研究与展望[J].*中国电机工程学报*,2016,36(3):729-738. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.03.017.
HUANG L L, CAO J L, ZHANG K H, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 729-738. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.03.017.
- [9] 符杨,黄路遥,刘璐洁,等.基于状态自适应评估的海上风电机组预防性维护策略[J].*电力自动化设备*,2022,42(1):1-9. DOI: 10.16081/j.epae.202110009.
FU Y, HUANG L Y, LIU L J, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbine based on state adaptive assessment [J]. *Electric power automation equipment*, 2022, 42(1): 1-9. DOI: 10.16081/j.epae.202110009.
- [10] SI X S, LI T M, ZHANG Q, et al. An optimal condition-based replacement method for systems with observed degradation signals [J]. *IEEE transactions on reliability*, 2018, 67(3): 1281-1293. DOI: 10.1109/TR.2018.2830188.
- [11] 李锁,黄玲玲,刘阳,等.基于风电机组状态信息的海上风电场维护策略[J].*现代电力*,2022,39(1):26-35. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0004.
LI S, HUANG L L, LIU Y, et al. An offshore wind farm maintenance strategy based on wind turbine condition information [J]. *Modern electric power*, 2022, 39(1): 26-35. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0004.
- [12] 黄海悦.基于零件可靠度的海上风电机组机会维护策略[D].北京:华北电力大学(北京),2018.
HUANG H Y. Offshore wind turbine opportunity maintenance strategy based on component reliability [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018.
- [13] 苏春,胡照勇,郑玉巧.基于可用度约束的风力机单部件顺序维修优化[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2019,49(1):110-115. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2019.01.016.
SU C, HU Z Y, ZHENG Y Q. Single part sequential maintenance optimization for wind turbines based on availability constraint [J]. *Journal of southeast university (natural science edition)*, 2019, 49(1): 110-115. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.

- 2019.01.016.
- [14] 速红霞, 张蕊萍, 董海鹰. 考虑故障相关性的风电机组维修策略 [J]. *可再生能源*, 2020, 38(4): 477-483. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2020.04.009.
- LU H X, ZHANG R P, DONG H Y. Considering maintenance strategy of wind turbines with fault correlation [J]. *Renewable energy resources*, 2020, 38(4): 477-483. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2020.04.009.
- [15] 符杨, 许伟欣, 刘璐洁, 等. 考虑天气因素的海上风电机组预防性机会维护策略优化方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(20): 5947-5956. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171695.
- FU Y, XU W X, LIU L J, et al. Optimization of preventive opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine considering weather conditions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(20): 5947-5956. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171695.
- [16] 符杨, 杨凡, 刘璐洁, 等. 考虑部件相关性的海上风电机组预防性维护策略 [J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 4057-4063. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0178.
- FU Y, YANG F, LIU L J, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbines considering component correlation [J]. *Power system technology*, 2019, 43(11): 4057-4063. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0178.
- [17] IRAWAN C A, OUELHADJ D, JONES D, et al. Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms [J]. *European journal of operational research*, 2017, 256(1): 76-89. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.05.059.
- [18] 王东. 多重相关性影响下的风机系统维护决策优化 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022. DOI: 10.27314/d.cnki.gsscu.2022.000433.
- WANG D. Optimization of wind turbine system maintenance decision under the influence of multiple correlations [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022. DOI: 10.27314/d.cnki.gsscu.2022.000433.
- [19] 鞠冠章, 王靖然, 崔琛, 等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究 [J]. *智慧电力*, 2022, 50(11): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013.
- JU G Z, WANG J R, CUI C, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation [J]. *Smart power*, 2022, 50(11): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013.
- [20] 程江洲, 冯馨以, 冯梦婷, 等. 计及气象因素的风电机组故障诊断与风险预测 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(22): 9645-9651. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.22.025.
- CHENG J Z, FENG X Y, FENG M T, et al. Wind turbine fault diagnosis and risk prediction considering meteorological factors [J]. *Science technology and engineering*, 2022, 22(22): 9645-9651. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.22.025.
- [21] 李凌飞, 孙悦, 黄莹, 等. 考虑恶劣天气影响的海上风电场及柔性直流并网系统可靠性评估 [J]. *南方电网技术*, 2020, 14(12): 32-42. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.12.005.
- LI L F, SUN Y, HUANG Y, et al. Reliability evaluation of offshore wind farm and VSC-HVDC integrated system considering the influence of extreme weather [J]. *Southern power system technology*, 2020, 14(12): 32-42. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.12.005.
- [22] 李欣, 段詠程. 基于改进隐马尔可夫模型的网络安全态势评估方法 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(7): 287-291. DOI: 10.11896/jsjx.190300045.
- LI X, DUAN Y C. Network security situation assessment method based on improved hidden Markov model [J]. *Computer science*, 2020, 47(7): 287-291. DOI: 10.11896/jsjx.190300045.
- [23] 朱焯秋, 樊帅. 基于改进连续隐马尔可夫模型的六极径向主动磁轴承转子位移软测量 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(11): 3933-3943. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201007.
- ZHU H Q, FAN S. Soft-sensing modeling for rotor displacements of six-pole radial active magnetic bearing using improved continuous hidden Markov model [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(11): 3933-3943. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201007.
- [24] 郑守红, 毕果, 苏史博, 等. 基于连续隐马尔可夫模型的砂轮磨削性能退化评估 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(6): 1064-1070. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202007015.
- ZHENG S H, BI G, SU S B, et al. Evaluation of grinding wheel degradation performance based on continuous hidden Markov model [J]. *Journal of Xiamen University (natural science edition)*, 2021, 60(6): 1064-1070. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202007015.
- [25] 沈云云. 基于连续隐马尔可夫模型的语音识别抗噪问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.003973.
- SHEN Y Y. Research on anti-noise of speech recognition based on continuous hidden Markov model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.003973.
- [26] 刘嘉宁, 潮铸, 钟华赞, 等. 电网调度操作过程中的天气风险源建模及分析 [J]. *广东技术师范学院学报(自然科学)*, 2016, 37(11): 8-12, 46. DOI: 10.13408/j.cnki.gjstxb.2016.11.003.

- LIU J N, CHAO Z, ZHONG H Z, et al. Weather risk sources quantified model and analysis for power grid dispatching [J]. *Journal of Guangdong Polytechnic Normal University*, 2016, 37(11): 8-12,46. DOI: [10.13408/j.cnki.gjxb.2016.11.003](https://doi.org/10.13408/j.cnki.gjxb.2016.11.003).
- [27] 熊小伏, 王尉军, 于洋, 等. 多气象因素组合的输电线路风险分析 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(6): 11-15,28. DOI: [10.3969/j.issn.1003-8930.2011.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8930.2011.06.003).
- XIONG X F, WANG W J, YU Y, et al. Risk analysis method for transmission line combining of various meteorological factors [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2011, 23(6): 11-15,28. DOI: [10.3969/j.issn.1003-8930.2011.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8930.2011.06.003).
- [28] 王建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(17): 143-153. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.211536](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.211536).
- WANG J, YAO J N, LIU Z Q, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(17): 143-153. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.211536](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.211536).
- [29] 高晨, 赵勇, 汪德良, 等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(增刊1): 30-42. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90275](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90275).
- GAO C, ZHAO Y, WANG D L, et al. Research status and prospect of condition based maintenance technology for offshore wind turbine electrical equipment [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2022, 37(Suppl. 1): 30-42. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90275](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90275).
- [30] 罗森森. 基于故障数据和监测数据的风电机组优化维修策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.000377](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.000377).
- LUO S S. Research on optimization maintenance strategy of wind turbine based on fault data and monitoring data [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.000377](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2019.000377).
- [31] 邓杰, 姜飞, 王文焯, 等. 考虑电热柔性负荷与氢能精细化建模的综合能源系统低碳运行 [J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1692-1702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373).
- DENG J, JIANG F, WANG W Y, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering electric-heat flexible load and hydrogen energy refined modeling [J]. *Power system technology*, 2022, 46(5): 1692-1702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373).
- [32] 马志侠, 张林鎰, 郑兴, 等. 基于PEMFC-P2G与风光不确定的综合能源系统优化调度 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 441-447. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0345](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0345).
- MA Z X, ZHANG L X, ZHENG X, et al. Optimal scheduling of integrated energy system based on PEMFC-P2G and impact of wind power and photovoltaic uncertainty [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(6): 441-447. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0345](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0345).
- [33] 蓝静, 朱继忠, 李盛林, 等. 考虑碳惩罚的电化学储能消纳风光与调峰研究 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(1): 9-17. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.002).
- LAN J, ZHU J Z, LI S L, et al. Research on electrochemical energy storage to assist new energy consumption and peak load regulation considering carbon penalty [J]. *Integrated intelligent energy*, 2022, 44(1): 9-17. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.002).
- [34] 谢敏, 何润泉, 刘明波, 等. 考虑复杂振动区特性的梯级水火电低碳机组组合模型与算法研究 [J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 645-657. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0900](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0900).
- XIE M, HE R Q, LIU M B, et al. Research on the model and algorithm for the hydro-thermal low-carbon unit commitment problem considering forbidden zone constraints [J]. *Power system technology*, 2023, 47(2): 645-657. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0900](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0900).
- [35] 李建涛, 姚鸿韦, 梅德文. 碳中和目标下我国碳市场定价机制研究 [J]. *环境保护*, 2021, 49(14): 24-29. DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.14.009](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.14.009).
- LI J T, YAO H W, MEI D W. Research on the pricing mechanism of China's carbon market under carbon neutralization target [J]. *Environmental protection*, 2021, 49(14): 24-29. DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.14.009](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.14.009).
- [36] 汪超群, 韦化, 吴思缘. 计及潮流约束的水火电力系统机组组合问题的分解-协调算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(11): 3148-3161. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.160677](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160677).
- WANG C Q, WEI H, WU S Y. A decomposition-coordination algorithm applied to hydro-thermal unit commitment problems with power flow constraints [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(11): 3148-3161. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.160677](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160677).
- [37] 代江, 田年杰, 姜有泉, 等. 考虑梯级耦合的水火电检修计划与机组组合协同优化 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(3): 83-91. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2022.03.010](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2022.03.010).
- DAI J, TIAN N J, JIANG Y Q, et al. Collaborative maintenance scheduling and unit commitment for hydropower and thermal power systems considering cascade hydropower coupling [J]. *Electric power engineering technology*, 2022, 41(3): 83-91. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2022.03.010](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2022.03.010).

- [38] 付聪, 王砚平, 刘俊磊, 等. 基于辅助优化问题的安全约束机组组合约束削减方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(21): 9-17. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210152.
FU C, WANG Y P, LIU J L, et al. Constraint reduction method for security-constrained unit commitment based on an auxiliary optimization problem [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(21): 9-17. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210152.
- [39] 代江, 田年杰, 姜有泉, 等. 考虑天然来水随机性的水火电系统机组检修计划 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 44-53. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211035.
DAI J, TIAN N J, JIANG Y Q, et al. Generator maintenance schedule of hydro-thermal power systems considering randomness of natural water inflow [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(12): 44-53. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211035.
- [40] 梅竞成, 齐冬莲, 张建良, 等. 一种考虑预测电价和碳排放成本的大规模机组检修决策方法 [J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(11): 3767-3776. DOI: 10.11999/JEIT220491.
MEI J C, QI D L, ZHANG J L, et al. A decision method of the large-scale unit maintenance scheduling considering predicted electricity price and carbon emission cost [J]. *Journal of electronics & information technology*, 2022, 44(11): 3767-3776. DOI: 10.11999/JEIT220491.
- [41] 俞晨玺, 孔维禄, 俞柏红, 等. 考虑需求响应的多目标机组检修调度优化 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 110-118. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190920.
YU C X, KONG W L, YU B H, et al. Multi-objective optimization of generation maintenance scheduling considering demand response [J]. *Power system protection and control*, 2020, 48(11): 110-118. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190920.
- [42] 代江, 姜有泉, 田年杰, 等. 考虑发电权交易的水火电机组检修双层优化 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 4143-4153. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210778.
DAI J, JIANG Y Q, TIAN N J, et al. Bi-level optimization for hydrothermal unit maintenance considering generation right transaction [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(10): 4143-4153. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210778.
- [43] WANG Y, KIRSCHEN D S, ZHONG H W, et al. Coordination of generation maintenance scheduling in electricity markets [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2016, 31(6): 4565-4574. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2514527.

作者简介:



何知纯

何知纯 (第一作者, 通信作者)

1998-, 女, 华南理工大学电气工程硕士, 主要从事电力系统智能化调度与控制、电力市场等方向研究工作 (e-mail) 1329029641@qq.com。

谢敏

1978-, 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统智能化调度与控制、电力市场等方向研究工作 (e-mail) minxie@scut.edu.cn。

黄莹

1999-, 女, 华南理工大学电气工程硕士, 主要从事电力系统智能化调度与控制、电力市场等方向研究工作 (e-mail) 1419928558@qq.com。

李弋升

1998-, 男, 华南理工大学电气工程硕士, 主要从事电力系统智能化调度与控制、电力市场等方向研究工作 (e-mail) 907353249@qq.com。

张世平

1998-, 男, 华南理工大学电气工程硕士, 主要从事电力系统智能化调度与控制、电力市场等方向研究工作 (e-mail) 1632522154@qq.com。

项目简介:

将新能源发电的 vine Copula 高维动态相依特性结合到配网调度模型中, 依据调度结果, 将配网转化为赋权复杂网络模型。基于种群模仿者演化动力学微分模型, 研究虚拟电厂动态聚合演化模型和演化稳定策略及虚拟电厂参与市场化交易的竞价策略和虚拟电厂内部调度的协同自治优化计算方法, 并构建了云-雾-边协同计算框架体系。

项目名称 广东省基础与应用基础研究基金面上项目“虚拟电厂动态聚合演化理论与计算方法研究”(2021A1515012245)

承担单位 华南理工大学电力学院

项目概述 主要研究内容为: 基于新能源发电高维动态相依特性能量调度的配网赋权网络建模; 虚拟电厂动态聚合的演化博弈理论与计算方法; 虚拟电厂演化博弈竞价与自治优化调度方法及实现框架。

主要创新点 (1) 提出新能源发电、储能、电动汽车、柔性负荷等特性各异分布式能源动态聚合成虚拟电厂的博弈模型; (2) 提出虚拟电厂参与市场化交易的博弈竞价策略和虚拟电厂内部迭代学习模型预测优化调度算法; (3) 构建虚拟电厂参与的云-雾-边博弈竞价与自治调控实现框架, 为交易机构开展市场模拟和风险预估、虚拟电厂运营商的潜在客户挖掘和业务区域扩展规划提供理论支撑和决策技术手段。

(编辑 孙舒)