

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308133

基于子空间线性二次高斯的风电机组 控制性能量化评估

王 琦¹, 张扬帆¹, 杨伟新¹, 梁 恺¹, 高 峰², 钱晨凯²

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

[摘 要] 针对目前风电机组控制性能综合评估时缺乏量化标准与评估方法的问题, 提出了一种基于子空间线性二次高斯 (LQG) 的控制性能量化评估方法, 利用子空间矩阵法求解出评估权衡曲线, 确立了风电机组 LQG 控制性能基准与评估指标。以增加塔架阻尼减载控制改造的机组作为评估算例, 采用 2 种数据处理策略进行改造前、后变桨控制性能的多变量综合量化评估。结果表明: 2 种数据处理策略均可得到准确有效的量化评估结果, 所提评估方法可以实现对控制策略优化效果的综合量化评价。

[关 键 词] 风电机组; 子空间矩阵; 控制性能评估; LQG 基准; 权衡曲线

[引用本文格式] 王琦, 张扬帆, 杨伟新, 等. 基于子空间线性二次高斯的风电机组控制性能量化评估[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 14-23. WANG Yu, ZHANG Yangfan, YANG Weixin, et al. Quantitative performance assessment of wind turbine control systems based on linear quadratic Gaussian subspace benchmark[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 14-23.

Quantitative performance assessment of wind turbine control systems based on linear quadratic Gaussian subspace benchmark

WANG Yu¹, ZHANG Yangfan¹, YANG Weixin¹, LIANG Kai¹, GAO Feng², QIAN Chenkai²

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the lack of quantitative standards and assessment methods in the current comprehensive assessment of wind turbine control performance, a quantitative assessment method of control performance based on subspace linear quadratic Gaussian (LQG) is proposed. The subspace matrix method is used to solve the assessment trade-off curve, and the benchmark and assessment index of LQG control performance of wind turbines are established. By taking the turbine retrofitted by adding tower damping and load shedding control as an example of the assessment, the multivariate comprehensive quantitative assessment of pitch control performance before and after retrofitting is carried out by using two kinds of data processing strategies. The results show that, both data processing strategies can obtain accurate and effective quantitative evaluation results, and the proposed evaluation method can realize the comprehensive quantitative evaluation of the optimization effect of control strategies.

Key words: wind turbine unit; subspace matrix; control performance assessment; LQG benchmark; trade-off curve

风电机组长期在复杂多变环境中运行, 其受控制策略落后、控制设备老化、控制参数失配等因素影响, 导致控制性能和发电效率下降^[1-3]。对风电机组进行控制性能评估, 能够有效解决该问题^[4-5]。此外, 风电机组控制策略通过评估可以量化控制性能

改造效果, 并且为后续改进提供参考。

文献[6]采用层次分析法建立了模糊综合评价模型, 并结合模糊趋势预测与劣化度分析法, 提高了评估结果的预测性, 有助于发现机组运行故障。文献[7]通过组合赋权法确定各指标权重, 并结合集

收稿日期: 2023-08-18

基金项目: 华北电力科学研究院自有资金项目 (KJZ2022059)

Supported by: Projects of North China Electric Power Research Institute (KJZ2022059)

第一作者简介: 王琦 (1992), 女, 博士, 主要研究方向为新能源发电与并网技术, yuwangelec@163.com。

通信作者简介: 高峰 (1976), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为风力发电机组性能评估与控制优化, gaofeng@ncepu.edu.cn。

对分析与证据理论得出机组运行状态隶属度，以此评估运行等级。文献[8]提出了一种基于动态阈值的评估指标劣化度方法，通过证据源思想建立风电机组健康状态评估模型。文献[9]在模糊评价模型中增加了相关性、标准差、偏差、均值分析等多角度参数，提高了指标隶属度精度。模糊评估策略具有不需要过多运行数据，实际应用范围广的优点^[6-9]，但往往只能得到定性分析，无法得到量化的评估结果来进一步评价机组运行状态。文献[10]从提升机组发电性能及发电量、改善机组安全性等方面，研究了风电机组改造后的评估方法，提出了常用的评估指标。文献[11]通过筛选机组有效数据，拟合机组实际运行中转矩增益系数，并对比理论最优值找出发电性能欠佳机组。文献[12]分别从弱网稳定性与机组载荷等多个方面建立了评价指标，对风电机组各种惯量控制方法进行统一客观评估。以上文献提出了具体的量化指标，但都局限于特定的控制策略或机组单一性能，应用面较窄，缺乏普适性^[10-12]。

在火电过程控制领域中，控制性能评估已经有了相关研究和实际应用^[13-15]。其中，基于最小方差控制（minimum variance control, MVC）的评估方法是以最小方差控制器的输出方差作为基准，并将该基准与当前系统输出方差的比值作为指标^[16]。但其评估结果往往过于保守，更适合作为其他评估方法的性能参考。而基于线性二次高斯（linear quadratic Gaussian, LQG）基准的评估方法，不仅能评价当前系统的输入、输出性能，还可以根据评估结果给出控制性能可提升的空间。文献[17]运用 LQG 基准的评估方法对加热炉控制器进行评估，并且根据评估结果选出了最佳调节参数的 PID 控制器，提升了加热炉系统的经济性。文献[18]将 LQG 基准与模型预测控制系统结合，通过求解稳态经济优化问题，对石化过程模型预测系统进行了经济性评估。文献[19]运用 LQG 评估诊断列车控制性能，并建立了控制性能下降模式库。

基于 LQG 基准的评估方法需要获得被控对象的线性化状态空间模型，而风电机组是典型的非线性系统，无法直接应用。本文首先使用权威风电仿真软件线性化功能获取机组在多个风速下的线性化模型，然后运用子空间 LQG 评估方法对风电机组全工况控制性能进行量化评估；且针对不同风速点风电机组 LQG 基准不同问题，根据数据量的不同提出了 2 种全工况评估策略；最后对机组控制策略改进前后的仿真数据，应用以上评估方法，实现

了 LQG 评估理论在风电机组控制性能综合评估中的应用，通过对评估结果分析和对比，验证了该评估方法的可行性和有效性。

1 基于子空间 LQG 的控制性能评估

1.1 LQG 控制性能评估基准

对于单输入、单输出控制系统，LQG 问题目标函数为：

$$J(\lambda) = E[y_t^2] + \lambda E[u_t^2] \quad (1)$$

而对于具有 m 个输出、 l 个输入的多输入多输出控制系统目标函数为：

$$J(\lambda) = E[\mathbf{Y}_t^T \mathbf{W} \mathbf{Y}_t] + \lambda E[\mathbf{U}_t^T \mathbf{R} \mathbf{U}_t] \quad (2)$$

式中：输入 $\mathbf{Y}_t = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ ；输出 $\mathbf{U}_t = [u_1, u_2, \dots, u_l]^T$ ； \mathbf{R} 与 \mathbf{W} 分别为输入与输出参数权重系数； λ 为输入方差的权值。

对于单输入、单输出系统，通过改变 λ 即可得到一系列输入输出方差 $E[y_t^2]$ 和 $E[u_t^2]$ ，然后将对应 $E[y_t^2]$ 和 $E[u_t^2]$ 绘制到 1 个坐标系中，则可形成如图 1 所示的权衡曲线。当 $\lambda=0$ 时即为最小方差控制，表示系统输出能达到方差的最小极限值；当 $\lambda=\infty$ 时为最小成本控制，即此时系统控制动作最小。

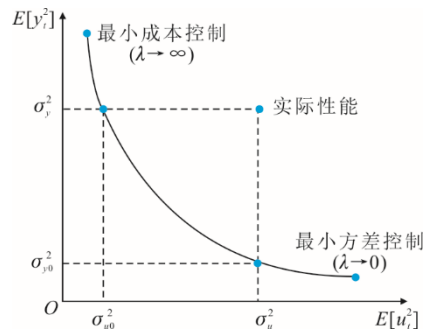


图 1 LQG 权衡曲线

Fig.1 The trade-off curve of LQG benchmark

图 1 中： σ_u^2 为当前系统实际性能点的输入方差； σ_y^2 为输出方差； σ_{u0}^2 为最优输入方差； σ_{y0}^2 为最优输出方差。输入方差性能指标 η_u 和输出方差性能指标 η_y 为：

$$\begin{cases} \eta_u = \frac{\sigma_{u0}^2}{\sigma_u^2} \\ \eta_y = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{y0}^2} \end{cases} \quad (3)$$

当 η_u 和 η_y 越接近 1 时，则表示系统控制性能越好；当 η_u 和 η_y 越接近 0 时，表示系统控制性能越差。此外根据式(3)，还可以给出当前控制系统的输入改进潜能指标 I_u 与输出改进潜能指标 I_y ，即在输入(输

出) 方差不变的条件下, 其输出(输入) 方差还能提升多少。 I_u 、 I_y 定义为:

$$\begin{cases} I_u = \frac{\sigma_u^2 - \sigma_{u0}^2}{\sigma_u^2} \\ I_y = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_{y0}^2}{\sigma_y^2} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 风电机组线性化模型子空间矩阵及权衡曲线求解

在某风速下对风电机组模型进行线性化, 假设其具有 1 个输入与 m 个输出, 则其离散状态空间方程可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{K}\mathbf{e}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{e}_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{e}_k 表示风电机组的风速扰动; \mathbf{K} 为卡尔曼滤波增益矩阵。

上述风电机组模型的子空间形式可表示为^[20-21]:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_f &= \mathbf{\Gamma}_N \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{H}_N \mathbf{u}_f + \mathbf{H}_N^S \mathbf{e}_f = \\ &\mathbf{L}_w \mathbf{w}_p + \mathbf{L}_u \mathbf{u}_f + \mathbf{L}_e \mathbf{e}_f \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{\Gamma}_N$ 为广义能观性矩阵; \mathbf{H}_N 与分别为 \mathbf{u}_k 与 \mathbf{e}_k 的低维分块三角 Toeplitz 矩阵; \mathbf{L}_w 为风电机组状态子空间矩阵; \mathbf{L}_u 为风电机组过程输入的子空间矩阵; \mathbf{L}_e 为风电机组扰动输入的子空间矩阵。

下标 p 表示过去量, f 则表示未来量, 若定义子空间矩阵行数为 N , 则:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_f &= \begin{bmatrix} y_{k+1} \\ \cdots \\ y_{k+N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_f = \begin{bmatrix} u_{k+1} \\ \cdots \\ u_{k+N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}_f = \begin{bmatrix} y_p \\ \cdots \\ u_p \end{bmatrix}, \\ \mathbf{y}_p &= \begin{bmatrix} y_{k-N+1} \\ \cdots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_p = \begin{bmatrix} u_{k-N+1} \\ \cdots \\ u_k \end{bmatrix} \end{aligned}$$

若 \mathbf{I} 表示单位矩阵, 则子空间矩阵可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{\Gamma}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \cdots (\mathbf{C}\mathbf{A})^T (\mathbf{C}\mathbf{A}^{N-1})^T \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{H}_N = \mathbf{L}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}\mathbf{B} & \mathbf{D} & \cdots & \mathbf{0} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{N-2}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{A}^{N-3}\mathbf{B} & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_N^S = \mathbf{L}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}\mathbf{K} & \mathbf{I} & \cdots & \mathbf{0} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{N-2}\mathbf{K} & \mathbf{C}\mathbf{A}^{N-3}\mathbf{K} & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

在得到子空间矩阵后, 即可进行评估基准权衡

曲线的求解。权衡曲线是获得系统输入、输出最优方差的关键。对于有限时域下的风电机组线性化模型, 式(2)可改写为:

$$\mathbf{J} = \sum_{k=1}^N [\mathbf{y}_k^T \mathbf{W} \mathbf{y}_k + \lambda \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k] \quad (8)$$

而式(6)最优子空间形式为:

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \mathbf{L}_w \mathbf{w}_p + \mathbf{L}_u \mathbf{u}_f \quad (9)$$

通过将式(9)代入式(8), 可以将 LQG 问题转换为最小优化问题, 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \min_{\mathbf{u}_f} [\hat{\mathbf{y}}_k^T \mathbf{W} \hat{\mathbf{y}}_k + \lambda \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k] = \\ &\min_{\mathbf{u}_f} [(\mathbf{L}_w \mathbf{w}_p + \mathbf{L}_u \mathbf{u}_f)^T \mathbf{W} (\mathbf{L}_w \mathbf{w}_p + \mathbf{L}_u \mathbf{u}_f) + \\ &\quad \lambda \mathbf{u}_f^T \mathbf{R} \mathbf{u}_f] \end{aligned} \quad (10)$$

然后, 对式(10)关于 \mathbf{u}_f 求偏导, 并将其设置为 0, 则当子空间行数 N 趋向于无穷时, 就可求解出 LQG 基准下的最优控制输入与最优控制输出^[22-23]。

2 风电机组线性化模型构建与控制性能评估

2.1 线性化模型构建

求取风电机组权衡曲线首先要获得当前机组模型的子空间矩阵 \mathbf{L}_u 与 \mathbf{L}_e , 而根据 2.1 节中式(7)可知, 子空间矩阵可以间接通过机组线性化模型的状态空间矩阵获得。因此, 本文利用 Open FAST 线性化功能模块^[24], 对 NREL-5MW 机组进行线性化, 5 MW 机组的基本信息见表 1, 状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{V}\mathbf{u} + \mathbf{B}_d \Delta \mathbf{u}_d \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{V}\mathbf{u} + \mathbf{D}_d \Delta \mathbf{u}_d \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}_d \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = [\mathbf{D}_{spc} \quad \mathbf{V}_{eIC}] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta \mathbf{u}$ 与 $\Delta \mathbf{u}_d$ 分别表示系统输入与扰动输入的变化量; \mathbf{B}_d 与 \mathbf{D}_d 均为扰动输入矩阵; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{S} 为刚度矩阵; \mathbf{P} 为阻尼矩阵; \mathbf{F} 为控制输入矩阵; \mathbf{F}_d 为风速扰动矩阵; \mathbf{V}_{eIC} 为速度输出矩阵; \mathbf{D}_{spc} 为位移输出矩阵。

而在本文算例机组状态空间模型中, 矩阵

A (24×24) 所对应的状态变量为塔架 1—6 阶位移及速度、叶片 1—4 阶位移及速度、叶片执行器位置、传动链阻尼与齿轮箱低速轴角位移及角速度。其中, 状态变量的个数并不固定, 可根据实际需求增加或减少自由度; B (24×2) 矩阵对应的输入变量为桨距角和发电机转矩; B_d (24×1) 所对应的扰动变量为风速; C (5×24) 矩阵对应的输出变量为机舱位移 (x 、 y 方向)、塔架中部载荷 (x 、 y 方向) 与发电功率; 矩阵 D 和 D_d 的维数则分别为 5×2 和 5×1 。此外, 上述变量排列顺序即为各状态空间方程中顺序。

表 1 5 MW 风力发电机组基本信息
Tab.1 Basic information of 5 MW wind turbine

项目	数值
发电机额定转速/(r·min ⁻¹)	1 173.7
传动比	97.0
叶片长度/m	61.5
发电机效率/%	94.4
额定功率/MW	5.0
额定发电机转矩/(N·m)	43 093.55
发电机最大转矩/(N·m)	47 402.91
额定风速/(m·s ⁻¹)	11.4

2.2 风电机组全工况控制性能评估方法

风电机组在实际运行中, 经常要面对复杂风况, 因此在湍流风况下对机组进行评估, 能够更准确地评估机组控制性能, 并验证评估方法的有效性。湍流工况有时风速变化较大, 并且不同风速下的机组线性化模型往往不同, 这导致不同风速点模型的权衡曲线也有较大差异。图 2 列出了 14 m/s 至 18 m/s 风速下的 LQG 权衡曲线。

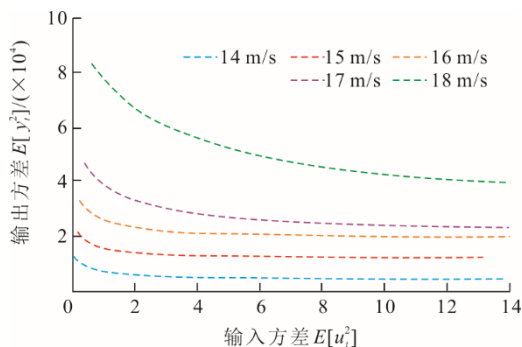


图 2 各风速 LQG 权衡曲线

Fig.2 The LQG trade-off curves at different wind speeds

从图 2 可见: 对于不同的风速, LQG 基准不尽相同, 其大致规律是风速越小, 权衡曲线越位于下部, 但并不严格遵守此规律; 曲线距 x 、 y 轴越近, 表明其可达的最优输入、输出方差越小。

从上述分析可知, 湍流风况若采取同一 LQG 基准的权衡曲线进行全工况控制性能评估, 并不能很好地权衡每个风速下的评估结果, 进而导致评估指标适用性较差, 不能实现全工况综合评估。对此本文根据评估数据时间段长度的不同提出了 2 种相应的评估策略。其中, 对于长时段的评估数据, 可采用基于风速概率分布的评估策略, 简称策略 1。策略 1 具体流程如下: 首先计算出整个工况下的风速跨度, 然后根据实际的需要, 以一定的风速间隔 (例如 0.5 m/s) 对风速跨度进行风速区间的划分; 在得到各风速区间后, 分别求出各区间对应的风速概率分布; 而在求解 LQG 权衡曲线时, 以各风速区间中心风速值作为风速点建立状态空间方程, 来得到对应的权衡曲线; 最后, 分别计算出各风速区间的控制性能指标, 并将各风速区间对应的分布概率作为控制性能指标的权重, 加权求和得到全工况的 LQG 综合性能指标。

上述策略从切分整个风速跨度的角度出发, 通过求取每个风速区间的指标, 综合得到最后 LQG 综合性能指标, 但对于风速剧烈变化的短时间评估数据, 并不能够很好地评估其动态控制特性。因此, 对于短时间段评估数据, 可以通过将整个时间段划分为多个较小的时间区间, 分别计算各区间的控制性能指标后再综合, 其基于时间区间的评估策略, 简称策略 2。策略 2 具体过程如下: 首先以一定的时间跨度为单位将整个仿真工况划分为若干时间区间, 然后分别计算各区间的风速均值, 并以该均值作为风速线性化点, 求解权衡曲线; 在计算控制性能指标时, 选择该时间区间的输入输出方差作为参与评估的实际方差; 最后, 在求得各时间区间的控制性能指标后, 再求其均值作为全工况的 LQG 综合性能指标。上述 2 种评估策略的流程如图 3 所示。

3 控制性能评估算例分析

3.1 塔架阻尼变桨控制仿真

塔架阻尼控制是通过监测塔架顶端的振动加速度, 在风电机组原有的变桨控制中引入塔架主动阻尼控制附加桨距角, 实现增加塔架一阶前后模态阻尼, 进而有效减小机舱及塔架前后方向位移, 从而达到减小塔架振动和载荷的目的^[25]。

本文以 NREL-5 MW 机组作为仿真对象, 对塔架阻尼控制策略改进前后的机组在图 4 湍流风下进行仿真, 为使对比结果更清晰, 下面仅选择前 100 s

仿真结果展示对比。图 5 和图 6 别为风电机组输入和输出的时域仿真结果。

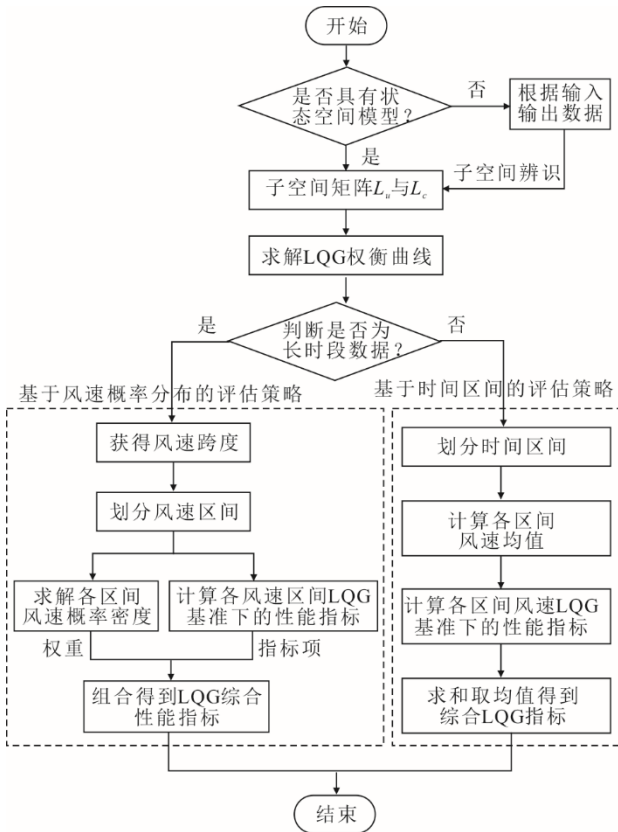


图 3 控制性能评估流程

Fig.3 Control performance evaluation process

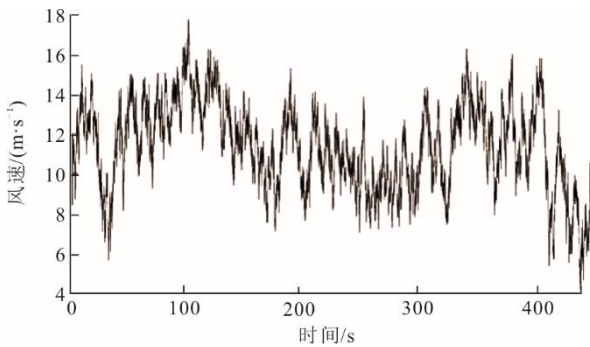
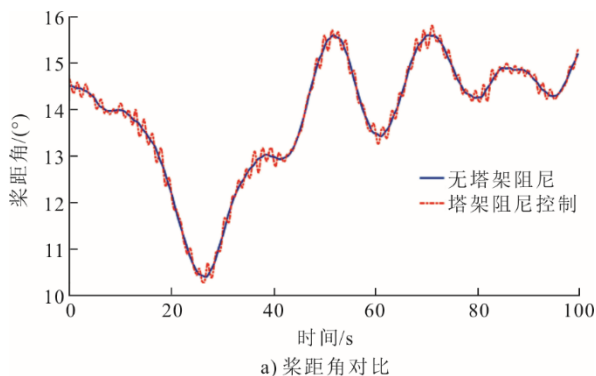
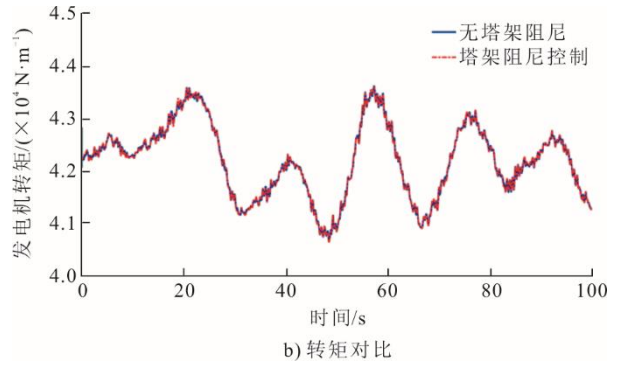


图 4 湍流风况

Fig.4 Turbulent wind conditions



a) 桨距角对比

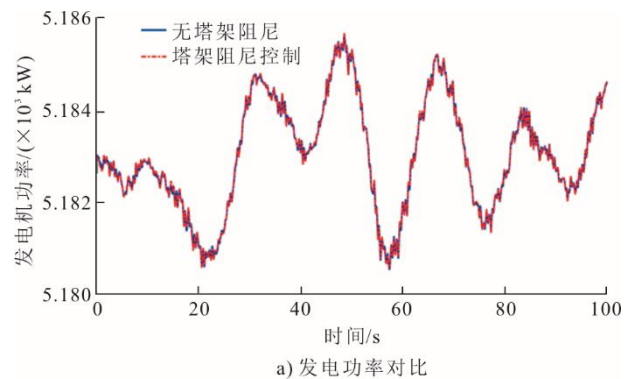


b) 转矩对比

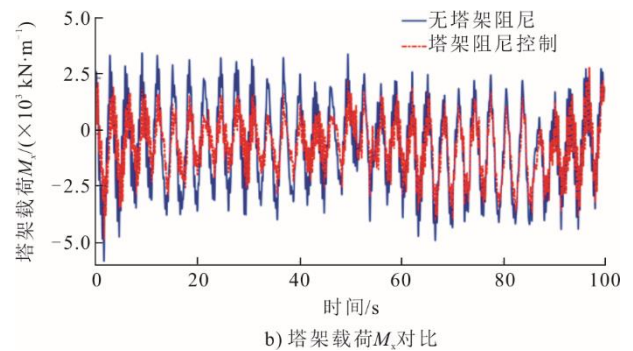
图 5 仿真输入对比

Fig.5 The simulation input comparison

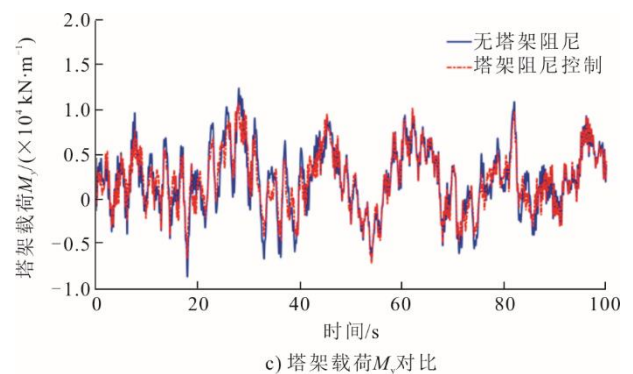
从图 5 可见：具有塔架阻尼控制的机组其桨距角的变化幅值增大、波动更为剧烈；但两者发电机转矩的变化情况较为相似，无明显差别。也就是说，带有塔架阻尼控制的机组在实际降载时，往往会造成桨距角控制动作的增加。



a) 发电功率对比



b) 塔架载荷 M_y 对比



c) 塔架载荷 M_z 对比

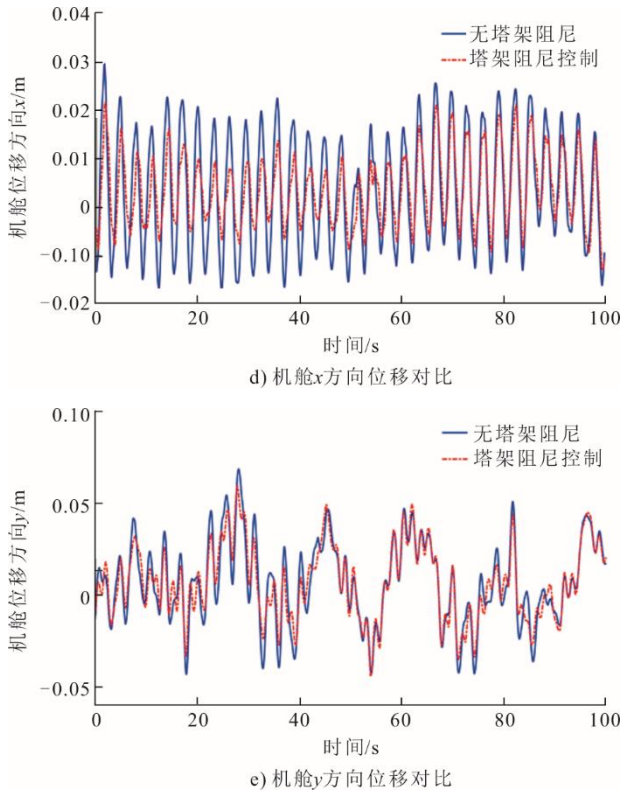


图6 仿真输出对比
Fig.6 The simulation output comparison

从图6可见：2种控制策略在功率输出上无明显差异；但在载荷与机舱位移的输出特性上显现出了明显的优劣。具有塔架阻尼控制的机组在塔架载荷 M_x 、 M_y 与机舱 x 、 y 方向位移上相对于无塔架阻尼控制机组幅值与波动得到了显著改善。表2为不同变量方差改善程度。由表2可见，有的变量控制方差在改造后反而上升，并不能很好地描述技改前后机组整体性能改善的程度。而1.1节中的LQG评估指标能够统一各参数的结果，得到综合评价指标，此外还能根据潜力指标，了解是否有进一步改善的可能。

表2 评估参数方差
Tab.2 Evaluation parameter variance

评估参数	无塔架阻尼控制	塔架阻尼控制
桨距角/(°)	3.958 4	3.972 4
发电机转矩/(N·m)	$4.396 2 \times 10^5$	$4.407 8 \times 10^5$
发电功率/kW	1.314 7	1.318 3
塔架载荷 M_x /(kN·m)	$1.552 4 \times 10^6$	$1.177 3 \times 10^6$
塔架载荷 M_y /(kN·m)	$1.286 7 \times 10^7$	$1.196 8 \times 10^7$
机舱 x 方向位移/m	$4.704 3 \times 10^{-4}$	$4.338 5 \times 10^{-4}$
机舱 y 方向位移/m	$5.728 7 \times 10^{-5}$	$4.149 3 \times 10^{-5}$

3.2 评估策略1 应用结果与分析

仿真风况的风速概率分布如图7所示，其中横

坐标表示风速区间，纵坐标为该风速的概率密度。由图7可以发现，风速集中分布于8~14 m/s。本文选择以1 m/s为单位对风速进行划分，共划分为15个区间，然后根据仿真输入输出的方差，分别计算各风速区间LQG基准曲线下的性能指标与潜力指标。

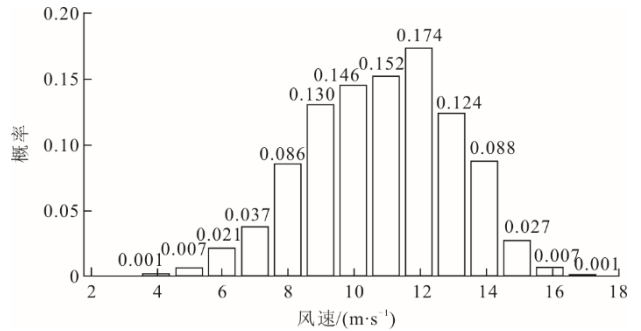


图7 风速概率分布
Fig.7 Probability distribution of wind speed

在权衡曲线的求解中，各参数设置为：子空间矩阵行数 $N=50$ ，LQG基准曲线离散点个数 $k=20\ 000$ ，即权重 λ 以0.01为间隔从0.01变化至200。下面将以15 m/s风速段为例，进行LQG控制性能指标的求解，其权衡曲线如图8所示。图8中黑色曲线为LQG权衡曲线；权衡曲线上方的点为该系统的实际输入输出方差性能点。然后，从任一实际性能点向 x 轴引垂线，与权衡曲线相交点的纵坐标即为该性能点的最优输出方差 σ_{y0}^2 (图中 Y_0)；同理 y 轴垂线的交点处横坐标即为最优输入方差 σ_{u0}^2 (图中 X_0)。在得到最优数值后，根据式(3)、式(4)进行LQG性能指标计算，结果见表3。

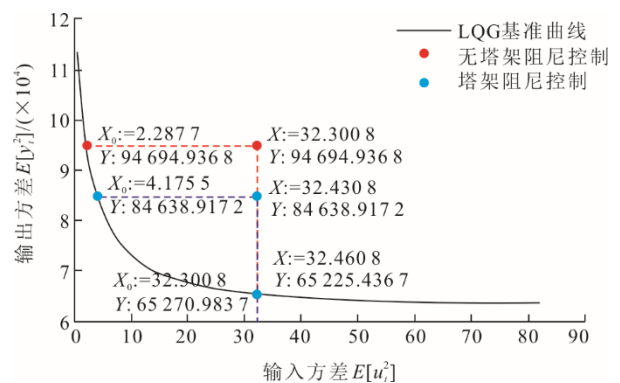


图8 15 m/s 风速区间下LQG权衡曲线
Fig.8 The LQG trade-off curve at 15 m/s wind speed range

表3 15 m/s 风速下LQG性能指标值
Tab.3 The LQG performance indexes at 15 m/s wind speed

评估参数	η_u	η_y	$I_u/\%$	$I_y/\%$
无塔架阻尼	0.070 8	0.689 0	92.92	31.10
塔架阻尼	0.128 6	0.770 6	87.14	22.94

由表 3 可知：15 m/s 风速下塔架阻尼控制机组 η_u 与 η_y 均大于无塔架阻尼控制机组，即前者的综合控制性能优于后者；但无控制机组则相较于有控制机组存在更大的改善空间，即 I_u 与 I_y 高于有控制的机组。其他风速区间评估结果如图 9 所示。

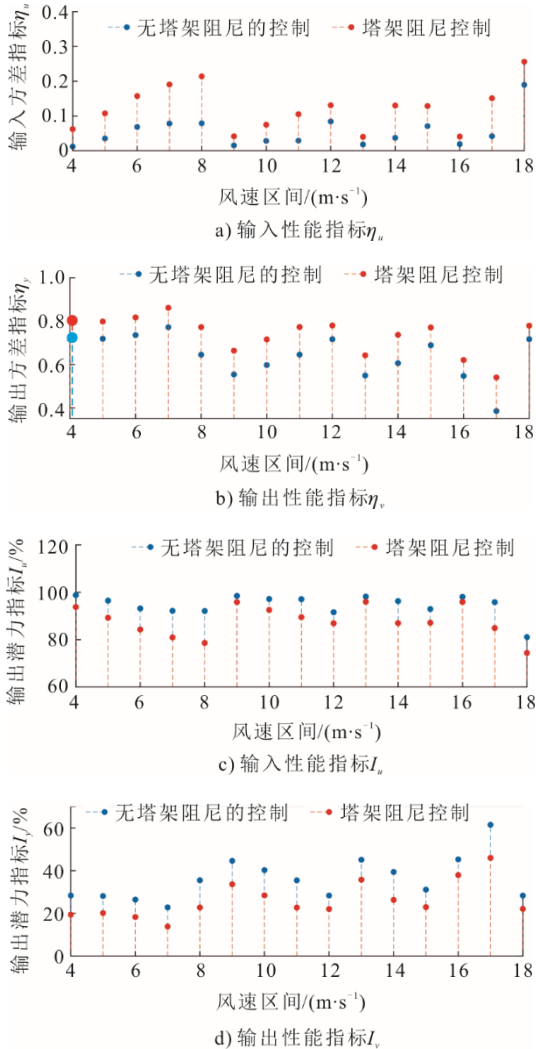


图 9 各风速区间下 LQG 性能指标
Fig.9 LQG performance indicators at various wind speed ranges

从图 9 可见，塔架阻尼控制机组在各风速区间下的 η_u 与 η_y 均大于无塔架阻尼控制机组，相对的 I_u 与 I_y 则均小于无塔架阻尼控制机组。最终在得到各风速区间的评估指标后，将其对应风速的概率作为权重，加权求和即可得到该工况下的 LQG 综合控制性能指标，结果见表 4。从表 4 数据可知：塔架阻尼控制机组在该工况下的综合控制性能优于无塔架阻尼控制机组，即改造策略具有其优越性和可行性；此外，塔架阻尼控制策略提升了机组 5.63% 的输入潜力与 10.29% 输出潜力。

表 4 LQG 综合控制性能指标（策略 1）
Tab.4 LQG comprehensive control performance indicators (Strategy 1)

评估参数	仿真机组	
	无塔架阻尼控制	塔架阻尼控制
输入性能指标 η_u	0.042 1	0.098 4
输出性能指标 η_y	0.623 4	0.726 3
输入潜力指标 I_u /%	95.79	90.16
输出潜力指标 I_y /%	37.66	27.37

3.3 评估策略 2 应用结果与分析

在策略 2 评估流程中，首先进行时间区间的划分，以 10 s 为划分单位，对整个仿真工况进行划分，一共可以得到 45 个时间区间；再分别计算各时间区间的风速均值（取整），并将该区间的实际方差性能点放入其风速均值对应的 LQG 基准曲线图。图 10 为所有风速均值为 13 m/s 区间的方性能点在对应权衡曲线附近的散落情况。图 10 共有 9 组散点，即共有 9 个时间区间使用该 LQG 基准计算控制性能指标，其评估指标求解方法同 3.2 节。本文在求解权衡曲线中共用 20 000 个离散点，而在求解过程中，可以通过增加离散点个数来使权衡曲线延长，图 10 中权衡曲线已收敛，为减少计算复杂度未增加离散点。

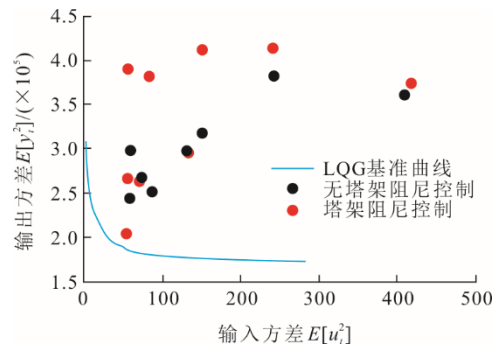
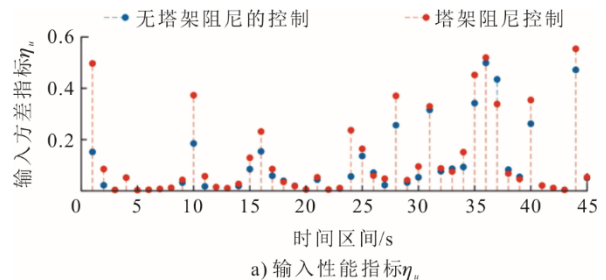


图 10 13 m/s 权衡曲线实际性能点散落
Fig.10 Scattering diagram of actual performance points on the 13 m/s trade-off curve

图 11 为各时间区间控制性能评估指标。从图 11 可见，大多时间区间中塔架阻尼控制机组的 η_u 与 η_y 高于无塔架阻尼控制机组，相应的 I_u 与 I_y 则小于无塔架阻尼控制机组。



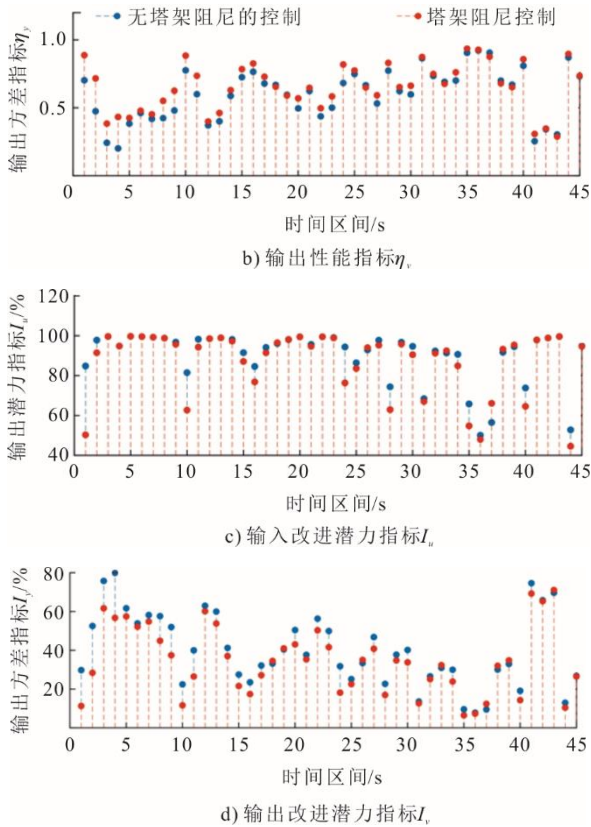


图 11 各时间区段下 LQG 性能指标
Fig.11 LQG performance indicators for each time period

最后，在得到各时间区间的 LQG 性能指标后再取均值，即可得到该策略下 LQG 综合控制性能指标，结果见表 5。表 5 得到的结论与 3.2 节类似，即塔架阻尼机组控制性能优于无塔架阻尼机组，但两者在输入输出特性提升的潜力上有部分差异。

表 5 LQG 综合控制性能指标（策略 2）
Tab.5 LQG comprehensive control performance indicators (Strategy 2)

评估参数	仿真机组	
	无塔架阻尼控制	塔架阻尼控制
输入性能指标 η_u	0.097 5	0.129 8
输出性能指标 η_y	0.601 0	0.655 3
输入潜力指标 $I_u/\%$	90.25	87.02
输出潜力指标 $I_y/\%$	39.90	34.47

3.4 评估策略对比

策略 1 与策略 2 采用了不同数据处理方法对风电机组进行控制性能评估，比较两者并归纳出每个策略的特性与适用范围，有利于在应用场景中发挥各自的优势，提升评估效率，同时也通过与传统 MVC 评估算法的比较来体现本文策略的正确性和优越性。策略 1 与策略 2 评估指标对比如图 12a)所示与 MVC 评估算法指标的对比如图 12b)所示。

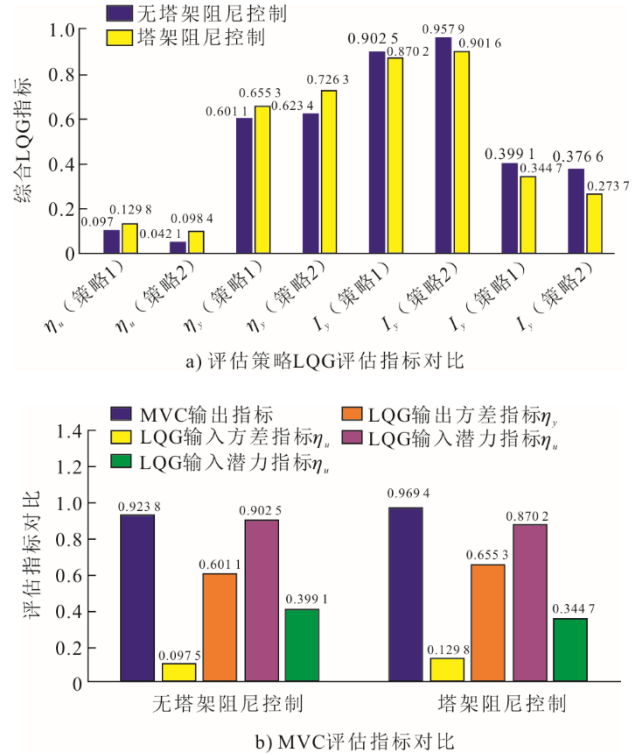


图 12 性能指标对比
Fig.12 Performance index comparison

从图 12a)可见，2 种评估策略得到的结果较为相似，但策略 1 在 500 次仿真运行时间的均值为 $3.734 3 \times 10^{-3}$ s，而策略 2 为 $9.260 1 \times 10^{-3}$ s。因此，策略 1 计算复杂度明显低于策略 2，因此更适用于处理长时间数据；但策略 2 相比于策略 1 能够对每个时间区间进行评估，这也意味着策略 2 的实时评估能力更强，能更好地体现风电机组的动态控制性能。从图 12b)可知：MVC 评估算法仅能比较系统输出性能的优劣，更侧重于对输出性能的单—评估；而 LQG 评估算法能够同时对系统输出输入进行评估，并且能够根据评估指标给出后续系统性能提升的潜力指标，其相较于 MVC 评估算法的结果更加综合全面，能够更好地反映机组整体性能。此外，塔架阻尼控制改造目的在于降低塔架载荷，对机组功率无明显影响，技改前平均风能利用系数均为 0.431 5，技改后平均风能利用系数为 0.431 4，两者基本相等。

综上所述，在本算例中 2 种策略大部分评估指标相近，少部分指标存在一定差异，但 2 种策略都能够得到正确的评估结论，且与 MVC 评估算法相比结果更为全面。策略 1 凭借其在计算速度上的优势，更适用于跨度数月或更长数据的粗评估；而策略 2 依靠其对每个时间区间的评估求解，更适用于对风电机组动态控制过程的性能评估。另外，需要

指出的是上述2种评估策略,均可通过细分风速区间或时间区间进一步提高自身精度。

4 结 论

本文针对现阶段风电机组控制策略改造缺少量化评估方法的问题,提出了一种基于子空间LQG的风电机组全工况评估方法,通过对仿真算例的评估与分析得出如下结论。

1) 相较于传统风电综合评估的定性分析,基于子空间LQG的评估方法能够对风电机组控制性能进行量化评估,且能得出输入输出性能提升空间。

2) 不同风速下,同一机组的LQG基准并不相同。因此,在湍流风下,若采用同一基准进行风电机组控制性能评估将会造成较大偏差。本文分别提出了基于风速概率分布与基于时间区段划分的评估策略解决LQG评估基准在风电上应用的问题。

3) 基于风速概率分布的评估策略能够有效降低计算复杂度,因此更适用于较长时间数据的粗评估。基于时间区段的评估策略,虽然计算复杂度高,但其能够更准确评估机组动态控制性能,因此适合于短时间动态控制过程的细评估。

本文在LQG基准的计算中选择了基于模型的算法,实际中机组准确线性化模型不易获得,这可能会带来较大评估误差。而子空间辨识算法能够直接根据系统输入输出数据得到LQG基准,不需要准确机组模型,因此可作为下一步研究内容。

[参 考 文 献]

- [1] 尹诗,侯国莲,迟岩,等.风电机组发电机前轴承健康度预测方法及实现[J].系统仿真学报,2021,33(6):1323-1333.
YIN Shi, HOU Guolian, CHI Yan, et al. Prediction method for health degree of front bearing of wind turbine generator and implementation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1323-1333.
- [2] 李孟珠,刘纲,黎华,等.大型风力机叶片状态监测方法研究进展[J].热力发电,2022,51(12):18-29.
LI Mengzhu, LIU Gang, LI Hua, et al. Research progress on condition monitoring methods of large scale wind turbine blades[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(12): 18-29.
- [3] 高峰,邓星星,吴小江,等.计及疲劳损伤评价的大型风电机组降载控制优化[J].动力工程学报,2019,39(7):565-575.
GAO Feng, DENG Xingxing, WU Xiaojiang, et al. Optimization of load reducing control for large-scale wind turbine considering fatigue damage evaluation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(7): 565-575.
- [4] 胡姚刚.大功率风电机组关键部件健康状态监测与评估方法研究[D].重庆:重庆大学,2017:7-8.
HU Yaogang. Study of health condition monitoring and assessment for critical components of large wind turbine generator systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 7-8.
- [5] 宋东然,梁梓昂,夏鄂,等.风电全生命周期成本建模与经济分析综述[J].热力发电,2023,52(3):1-12.
SONG Dongran, LIANG Ziang, XIA E, et al. Overview of wind power life-cycle cost modeling and economic analysis[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 1-12.
- [6] 肖运启,王昆朋,贺贯举,等.基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2132-2139.
XIAO Yunqi, WANG Kunpeng, HE Guanju, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbine based on trend predication[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.
- [7] 周淦,徐清鹏,李剑,等.融合集对分析和证据理论的风电机组运行状态评估[J].电力自动化设备,2017,37(7):38-45.
ZHOU Quan, XU Qingpeng, LI Jian, et al. Operating state assessment based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-marking for wind turbine generator unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 38-45.
- [8] 胡姚刚,李辉,刘海涛,等.基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估[J].太阳能学报,2018,39(2):331-341.
HU Yaogang, LI Hui, LIU Haitao, et al. Evaluation of health status of wind turbine based on multiple evidence method[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(2): 331-341.
- [9] 李进友,李媛,冯冰,等.基于随机组合赋权模糊评价的风电机组健康状态评估[J].太阳能学报,2022,43(8):340-351.
LI Jinyou, LI Yuan, FENG Bing, et al. Wind turbine health state assessment based on stochastic combination weighting fuzzy evaluation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(8): 340-351.
- [10] 韩斌,赵文超,刘庆元,等.风电机组改造后的评估技术及方法[J].船舶工程,2019,41(增刊1):372-374.
HAN Bin, ZHAO Wenchao, LIU Qingyuan. Evaluation techniques and methods for technical transformation of wind turbine[J]. Ship Engineering, 2019, 41(Suppl.1): 372-374.
- [11] 孙栋建,冯震,叶杭冶,等.基于运行数据的风电机组转矩控制性能评估[J].太阳能,2020(5):74-79.
SUN Dongjian, FENG Zhen, YE Hangye, et al. Performance evaluation method of wind turbine torque control based on operation data[J]. Solar Energy, 2020(5): 74-79.
- [12] 邵昊舒,蔡旭,周党生,等.风电机组虚拟同步及惯量控制方法分析与测试评估[J].高压电技术,2020,46(5):1528-1537.
SHAO Haoshu, CAI Xu, ZHOU Dangsheng, et al. Analysis and test evaluation of VSG and virtual inertia control method for wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1528-1537.
- [13] 刘阳,王亚刚.最小熵基准的并行串级控制系统的性能评估[J].控制工程,2019,26(10):1899-1904.
LIU Yang, WANG Yagang. Performance assessment of parallel cascade control system based on minimum entropy[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(10): 1899-1904.
- [14] 黄青岭.火电机组控制系统性能评估及优化[D].南

- 京: 东南大学, 2020: 23-30.
HUANG Qingling. Performance evaluation and optimization of thermal power unit control system[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 23-30.
- [15] LI R, WU F, HOU P, et al. Performance assessment of FO-PID temperature control system using a fractional order LQG benchmark[J]. IEEE Access, 2020, 8: 116653-116662.
- [16] 陈飞. 基于方差指标的控制性能评估方法与系统设计[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 3-4.
CHEN Fei. Control performance assessment method and system design based on variance index[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 3-4.
- [17] FANG T, ZHANG R, GAO F. LQG benchmark based performance assessment of IMC-PID temperature control system[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(51): 15102-15111.
- [18] SHI Y, ZHANG Z, XIE L, et al. ILC-based two-layer strategy for economic performance improvement in industrial MPC systems[J]. Journal of Process Control, 2021, 108: 136-147.
- [19] 刘伯鸿, 连文博, 李婉婉. 基于子空间 LQG 的高速列车预测控制器性能监控[J]. 振动.测试与诊断, 2021, 41(6): 1226-1231.
LIU Bohong, LIAN Wenbo, LI Wanwan. Performance monitoring of high speed train predictive controller based on subspace LQG[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1226-1231.
- [20] KADALI R, HUANG B. Controller performance analysis with LQG benchmark obtained under closed loop conditions [J]. ISA Transactions, 2002, 41(4): 521-537.
- [21] 赵玲. 多变量控制系统性能评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2016: 29-32.
ZHAO Ling. Performance assessment of multivariable control systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016: 29-32.
- [22] XU F, HUANG B. Performance monitoring of SISO control loops subject to LTV disturbance dynamics: An improved LTI benchmark[J]. Journal of Process Control, 2006, 16(6): 567-579.
- [23] HARRIS T J, YU W. Controller assessment for a class of non-linear systems[J]. Journal of Process Control, 2007, 17(7): 607-619.
- [24] JONKMAN J M, BUHL M L. Fast user's guide[M]. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2005: 39-44.
- [25] 田德, 黄明月, 唐世泽, 等. 大型风电机组输出功率与塔架载荷自抗扰控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 466-472.
TIAN De, HUANG Mingyue, TANG Shize, et al. Output power and tower load control of large-scale wind turbine based on active disturbance rejection control[J]. Acta Energetiae Solaris Sinica, 2023, 44(5): 466-472.

(责任编辑 杨嘉蕾)