

基于风力机组机舱振动预测的 风电场功率可靠调度研究^{*}

刘楠

(重庆工业职业技术学院电子与物联网工程学院 重庆 401122)

摘要: 传统风电场功率调度实现主要采用偏航控制方式,然而风力发电机组的偏航过程实际执行可否依赖于机组安全状态(机舱振动测量)评估效果,这就导致实际风力发电场功率可靠调度不准确。为此提出了基于风力发电机组机舱振动加速度预测的风电场功率可靠调度方法。首先针对机组偏航过程的机舱振动机理建模困难的问题,利用深度神经网络构建机舱振动加速度模型,然后在预测控制框架下,结合机舱振动加速度预测,提出风力发电场功率可靠调度方法,提升风电场功率安全调度的 3%。最后利用 Fast Farm 构建 12 个风力发电机组的风力发电场,验证所提方法的有效性。

关键词: 机舱振动预测;风电场功率调度;机舱振动模型;预测控制

中图分类号: TM315;TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on reliable dispatch of wind farm power based on wind turbine nacellen vibration prediction

Liu Nan

(School of Electronics and Internet of Things Engineering, Chongqing Industry Polytechnic University, Chongqing 401120, China)

Abstract: The traditional implementation of power scheduling in wind farms mainly adopts yaw control methods. However, whether the yaw process of wind turbine generators can be actually carried out depends on the assessment effect of the safety status of the units (nacelle vibration measurement), which leads to inaccurate reliable power scheduling in actual wind farms. For this purpose, this paper proposes a reliable power scheduling method for wind farms based on the prediction of the vibration acceleration of the nacelle of wind turbine generators. Firstly, aiming at the difficulty in modeling the nacelle vibration mechanism during the yaw process of the unit, a deep neural network is utilized to construct the nacelle vibration acceleration model. Then, under the predictive control framework, combined with the prediction of nacelle vibration acceleration, a reliable power scheduling method for wind farms is proposed to improve the accuracy of power safety scheduling in wind farms by 3%. Finally, a wind farm with 12 wind turbine generators was constructed using Fast Farm to verify the effectiveness of the method proposed in this paper.

Keywords: nacellen vibration prediction; wind farm power scheduling; nacellen vibration model; model predictive control

0 引言

为获取更多的风能,提高有限地域范围内发电能力,当前风力发电场内机组密度不断提高,机组的规模不断提高,机组的规模不断大型化,导致风力发电场尾流效应显著,需要全场协同调度保证全场发电能力^[1]。同时,尾流效应也导致各风力发电机组入风不稳定和不一致,增大了机组动态载荷和疲劳载荷,严重影响了机组的运行安全和功率控

制执行能力,使得机组不能可靠地完成场级控制指令,影响风电场全场功率调度效率和精度。

关于风电场功率可靠安全调度,国内外学者开展了研究,特别是近几年将载荷安全和功率优化结合。载荷安全主要分为疲劳载荷安全和动态载荷安全;功率调度主要分为功率最大化和功率跟踪。为减低疲劳载荷并功率最大化,武晓冬等^[2]针对风电场中存在风电机组之间疲劳不均匀而导致部分机组寿命提前衰减的问题,提出了一种基于

疲劳分布的风电场有功优化调度策略;杨伟峰等^[3]则提出一种考虑疲劳载荷的风电场分散式有功功率策略;Yao 等^[4]通过优化功率调度,最小化风力发电机组的整体疲劳载荷;张彬彬等^[5]提出了一种基于小波阈值去噪(wavelet threshold denoising, WTD)和遗传算法(genetic algorithm, GA)优化变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)的信号分解算法;Tao 等^[6]为了进一步协同优化风力发电机组整体载荷,构建了多目标函数以平衡风电场以及每个风力发电机组的总疲劳载荷,改善传统有功功率控制策略在不均匀的风资源分布中导致的疲劳负荷分布不平衡。

针对疲劳载荷减低及功率跟踪,Yao 等^[7]考虑降级运行操作工况,提出了一种有功功率调度方法以平衡疲劳载荷分布;Yang 等^[8]将跟踪功率参考与二次规划优化算法相结合,以降低风力发电机组的疲劳载荷;Zhang 等^[9]提出了一个由离线疲劳数据评估创建的查找表,用于在线优化疲劳载荷和功率调度;Vali 等^[10]设计了结构载荷均衡的约束优化问题,最小化功率参考跟踪误差和风力涡轮机平均疲劳载荷。而动态载荷安全及功率优化主要基于机组状态开展研究。魏赏赏等^[11]根据发电状态对机组进行详细分类,并确定各类机组的功率调节能力,在限功率下实施风电场有功功率优化跟踪调度;王鑫等^[12]则提出一种基于风电机组健康状态优化的风电场功率分配控制策略。虽然动态载荷安全的风力发电场功率调度已有深度研究^[13],然而主要考虑极限动态载荷,未充分考虑尾流场及尾流重定向控制带来的气动载荷不平衡安全。风力发电机组气动载荷不平衡安全主要表现在机舱振动超限。风力发电机组机舱振动的安全国家标准 GB/T 25385-2010《风力发电机组振动状态监测导则》和 VDI3834 标准,明确了机舱振动超限对风力发电机组安全运行的重要影响。因此在尾流场作用下,相对于极限动态载荷安全,机组的振动安全更为重要。

因此本文从风力发电机组振动安全的角度,基于预测控制框架开展风电场功率可靠调度方法研究,提升风力发电场功率调度的准确性、可靠性。

论文潜在的创新点在于:

1)针对尾流场及尾流重定向控制下,风力发电机组振动动力学模型建模困难的问题,提出了基于 CNN-GRU(convolutional neural network-gated recurrent unit)深度神经网络模型,描述了风力发电机组振动动力特性,实现了机组振动加速度预测;

2)提出了基于风力发电机组振动加速度预测及安全评估的风电场功率可靠调度策略,充分考虑了机组在未来时段内的安全状态及参与调度的能力,提升了风电场功率调度准确性和可靠性。

1 问题分析

风力发电场为提升发电能力,通常采用降额控制和尾流重定向两类尾流控制方式。尾流重定向控制方式更为有

效提升全场发电能力,成为当前风力发电场尾流控制的主要方式。尾流重定向控制方式需要风力发电场根据功率调度需求,优化分配各机组的偏航角度。风力发电机组则根据偏航控制指令完成偏航动作。

如图 1 所示,通过调整机组迎风方向,改变尾流分布,减少下游机组受尾流影响的区域。

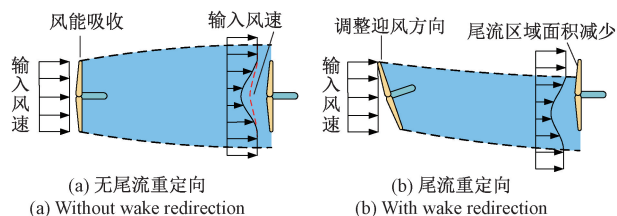


图 1 尾流重定向控制原理示意图

Fig. 1 Schematic of wake redirection control principle

然而,如图 1(b) 所示,在尾流重定向过程中,上游机组的尾流场变化,改变了下游机组叶轮运行空间范围,使得机组运行气动载荷不平衡,易导致机组振动超限,触发安全报警。叶轮随风旋转时,作用在每一个叶素上的气动力一般包括切向气动力 F_T 和轴向气动力 F_N , 方向分别是平行、垂直于叶轮的旋转平面。同时由于尾流重定向后,叶轮入流不均匀,导致每个叶素受力存在的偏差增大。

如图 2 所示, F_T 的作用是产生气动转矩输出给发电机。令 $F_{TC} = F_T - F_{T1}$, 则气动不对称可以等效为在正常工况下的气动力上附加了一个反向不对称力 F_{TC} 。根据力的平移原理, F_{TC} 可以等效为在主轴处的附加力 F_{TC} 和附加转矩 T_C , 同理, 轴向推力 F_{N1} 也可以等效成 F_N 以及主轴处附加力 F_{NC} 和弯矩 M_C , 叶轮主轴旋转中心发生变化, 使得机舱和塔座都会产生振动, 从而来流风速相对叶片各叶素的速度发生改变, 使得 3 个叶片所受的气动力和转矩发生变化和波动, 该波动的频率等于叶轮的转频。

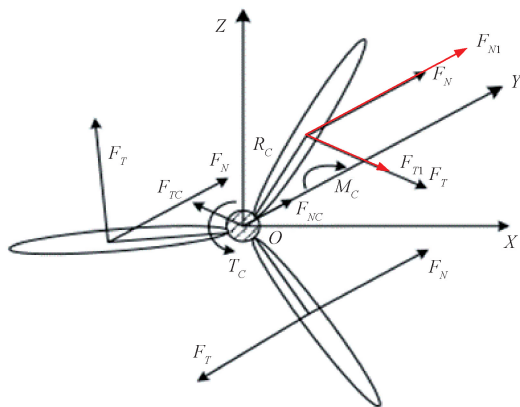


图 2 尾流重定向控制下叶轮气动不平衡分析

Fig. 2 Aerodynamic unbalance analysis of wind turbine under wake redirection control

由上分析可知,风力发电场尾流重定向控制易导致下游风力发电机组气动载荷不平衡,出现振动安全超限等问

题。当下游风力发电机组处于振动安全超限状态,则不能参与偏航控制重定向尾流,使得机组不能参与风力发电场全场功率调度,影响全场功能调度效率。为此本文提出复杂尾流场下风力发电机组振动加速度预测方法,以及相应的风力发电场功率调度方法。

2 方法描述

2.1 振动加速度预测模型

入风驱动下,风力发电机组叶片受压差影响旋转,带动传动机构,驱动发电机产生电能。在尾流场中,上游机组产生的尾流场和机组自身的偏航角度影响机组的叶轮受力分布,决定了气动载荷不平衡程度。机组轴向诱导因子和叶轮转矩反映了机组将风能转化为机械能的程度,表现了能量转化过程中机械载荷情况。因此将在不同尾流场、偏航

状态下的风力发电机组振动动力学模型表达为:

$$\begin{bmatrix} Acc_{ix}(k+1) \\ Acc_{iy}(k+1) \end{bmatrix} = G_{Acc}(v_i(k), \gamma_i(k), \tau_i(k), \alpha_i(k), W_i(k), Acc_{ix}(k), Acc_{iy}(k)) \quad (1)$$

其中, $Acc_{ix}(k)$ 和 $Acc_{iy}(k)$ 分别为第 i 台机组在 X 和 Y 方向的振动加速度, $W_i(k)$ 为第 i 台机组叶轮面的尾流参数, $\alpha_i(k)$ 为第 i 台机组轴向诱导因子, $\tau_i(k)$ 表征第 i 台机组叶轮转矩, $\gamma_i(k)$ 为第 i 台机组偏航角度组成的控制作用向量, $v_i(k)$ 为第 i 台机组的尾流场输入风速。

由于风力发电机组振动动态特性具有显著的非线性特性,而且尾流场对机组振动的影响过程复杂,采用机理建模过程难度较大,故采用深度神经网络模型进行构建,其网络结构如图 3 和 4 所示。卷积神经网络模型(convolutional neural network, CNN)深度挖掘特征空间的非线性空间关

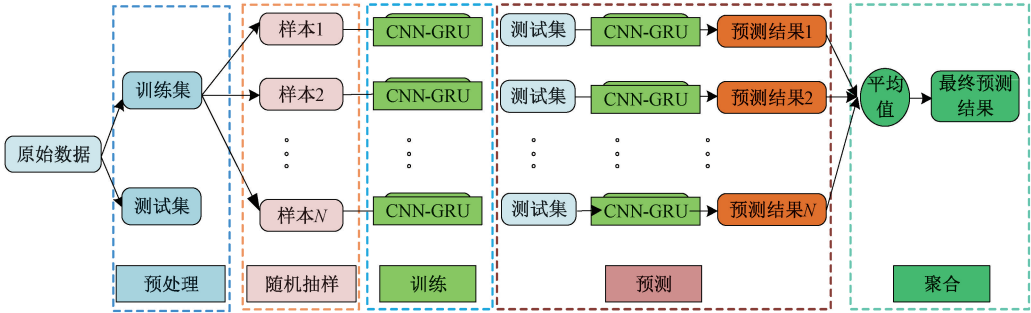


图 3 机组振动加速度神经网络预测模型

Fig. 3 Neural network prediction model for unit vibration acceleration

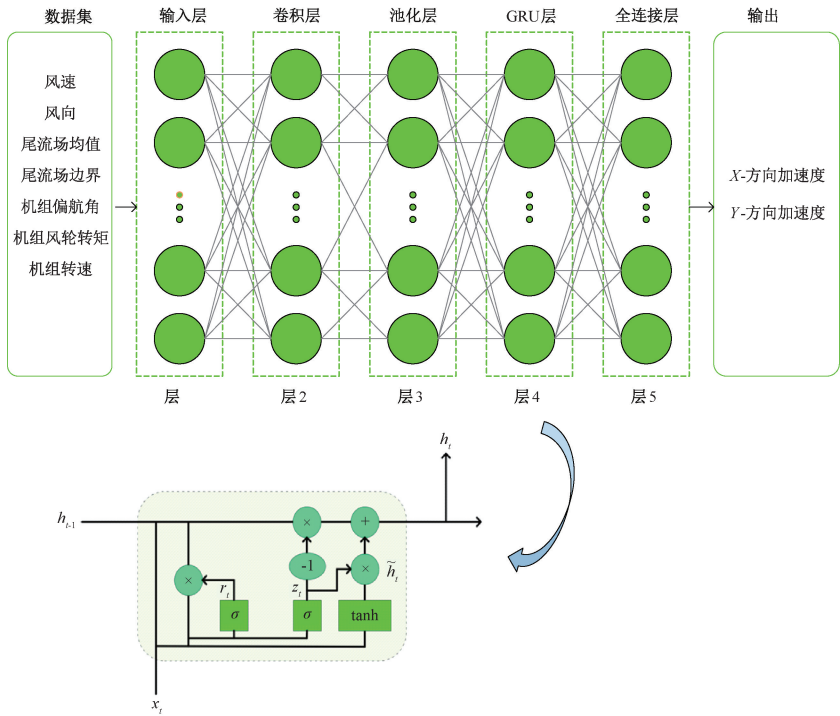


图 4 CNN-GRU 的组合模型

Fig. 4 Combination model of CNN-GRU

联,生成具有强表征能力的高维特征张量,挖掘各因素与振动加速度的相关性。门控循环单元(gated recurrent unit,GRU)构建时序依赖建模模块,取代传统全连接层的线性映射机制,挖掘各因素在时间上的时序特征,以求将时间相关性与空间相关性综合考虑,提高对振动加速度的预测精度。从而 CNN-GRU 的组合模型构建端到端的振动加速度预测框架,将具有良好特征提取性能的 CNN 模型与 GRU 结合。

训练过程历史数据和仿真数据,划分风力发电机组偏航过程的各种工况,包括风速、风向、尾流场参数、偏航角、机组叶轮转矩、机组转速等。对于安装了激光雷达的实际运行风机,以上数据可从 SCADA(supervisory control and data acquisition)系统获取。

2.2 动态尾流模型

风力发电机组的动态尾流场模型结合单机尾流模型和偏航尾流模型^[14]构建得到:

$$\begin{cases} v_i(t) = v_0(t - \tau_{v_0 \rightarrow i}) \\ \left(1 - \sqrt{\sum_{j \in \Gamma} \left(F(t - \tau_{v_0 \rightarrow j}) \phi(t - \tau_{v_0 \rightarrow j}) \frac{S_{ji}(t - \tau_{v_0 \rightarrow j})}{S_i}\right)^2}\right) \\ F(t - \tau_{v_0 \rightarrow i}) = \frac{1}{(a' + b'x/D + p')^2} \\ \phi(t - \tau_{v_0 \rightarrow i}) = \exp\left(-\frac{r^2}{2(k'x + \epsilon')^2}\right) \\ r' = \sqrt{(y - y_d)^2 + (z - H)^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} a' = 0.93C_T^{0.75} I_a^{0.75} \\ b' = 0.42C_T^{0.6} I_a^{0.2} \\ p' = \frac{0.15C_T^{-0.25} I_a^{-0.7}}{(1 + x/D)^2} \\ k' = 0.11C_T^{1.07} I_a^{0.20} \\ \epsilon' = 0.23C_T^{-0.25} I_a^{0.17} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中 $v_0(t)$ 为风电场输入风速, $v_i(t)$ 为风力发电机组 i 的入风, j 为风力发电机组 i 的前排风力发电机组, Γ 为相应的机组集合, $\tau_{j \rightarrow i}$ 为上游机组尾流到达下游机组轮毂的时间, $F(\cdot)$ 表示轴向不同位置处的速度衰减幅值与轮毂高度入流风速的比值, $\phi(\cdot)$ 表示尾流速度衰减在径向上的自相似分布。 S_i 为下游风电机组 i 的叶轮扫掠面积, S_{ji} 为上游机组 j 的尾流在下游机组处与下游机组 i 叶轮扫掠区域的重合面积。 r 表示与尾流中心之间的距离, y_d 为机组由偏航引起的尾流中心偏移距离, H 为风电机组轮毂高度。

式(3)中 a' 、 b' 、 p' 、 k' 和 ϵ' 是在等效推力系数 C_T 下的模型参数^[15]。 $I_a = 0.06$, 推力系数 C_T 通过风速和相应的机组 C_T 曲线确定。在机组偏航状态下, D 为风电机组叶轮直径。

2.3 基于振动加速度预测的风力发电场功率可靠调度

如图 5 所示,为保证功率可靠调度,首先在调度前针对风电场进行安全状态分析,振动加速度超限机组不参与

功率调度。基于式(1)中的深度神经网络建立预测时间域的状态预测轨迹模型,构建风力发电场全场调度目标代价函数以及机组振动加速度安全约束。

$$\begin{cases} \min J(k) = - \sum_{h=0}^{M-1} \| \mathbf{p}(k+h|k) \|_Q + \\ \sum_{h=0}^{M-1} \| \boldsymbol{\gamma}(k+h|k) \|_R \\ \text{s. t. } (2) \\ v_i(k+1|k) = v_0(k) \left(1 - \sqrt{\sum_{j \in \Gamma} \left(F(k) \phi(k) \frac{S_{ji}(k)}{S_i}\right)^2}\right) \\ p_i(k) = 2\rho\pi R^2 v_i^3(k) \alpha_i(k) (\cos(\tau_i \gamma_i(k)) - \alpha_i(k))^2 \\ \gamma_{\min} \leq \gamma_i(k+h|k) \leq \gamma_{\max} \\ v_{\min} \leq v_i(k+h|k) \leq v_{\max} \\ 0 \leq p_i(k+h|k) \leq p_e \\ 0 \leq \text{Acc}_{ix}(k+h|k) \leq A_{eX} \\ 0 \leq \text{Acc}_{iy}(k+h|k) \leq A_{eY} \\ \begin{bmatrix} \text{Acc}_{ix}(k+h|k) \\ \text{Acc}_{iy}(k+h|k) \end{bmatrix} = G_{\text{Acc}}(v_i(k+h|k), \gamma_i(k+h|k), \tau_i(k+h|k), \alpha_i(k), W_i(k)) \end{cases} \quad (4)$$

其中, M 为预测时域长度, $Q > 0$, $R > 0$ 代表加权重, $v_0(k+h-1)$ 为风电场未来时刻的输入风速。 $\boldsymbol{\gamma}(k)$ 为风电机组的偏航角度组成的控制作用向量, $\mathbf{v}(k)$ 为风电机组为的输入风速组成的状态向量, $\mathbf{p}(k)$ 为风电机组可捕获功率组成的输出向量。 $\rho(k)$ 为 k 时刻的空气密度, R 为风力发电机组的叶轮直径, $\gamma_i(k)$ 为第 i 台机组的偏航角度。 $\alpha_i(k)$ 为第 i 台机组轴向诱导因子, $\tau_i(k+h|k)$ 表征第 i 台机组叶轮转矩。 $\text{Acc}_{ix}(k+h|k)$ 和 $\text{Acc}_{iy}(k+h|k)$ 分别为第 i 台机组在 X 和 Y 方向的振动加速度。 $v_i(k+h|k)$ 为第 i 台机组的尾流场输入风速。 $\tau_i(k+h|k)$ 为第 i 台机组的叶轮转矩。 $v_{\min}$ 为切入风速; $v_{\max}$ 为切出风速, p_e 为风电机组的额定功率, A_{eX} 和 A_{eY} 分别机组在 X 和 Y 方向的振动加速度安全阈值, $W_i(k)$ 为第 i 台机组叶轮面的尾流参数。 $G_{\text{Acc}}(\cdot)$ 为风力发电机组振动加速度预测模型。

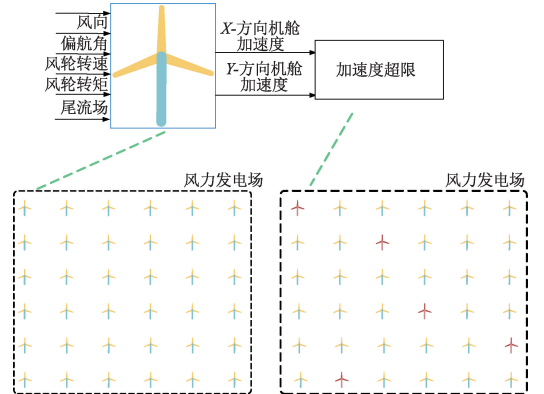


图 5 风力发电场参与机组安全判断

Fig. 5 Safety assessment of participating wind turbines in wind farm

注 1:求解以上风电场功率调度预测控制器为非线性优化问题。特别是振动加速度模型为深度神经网络建模,需采用神经网络类-智能进化算法求解。由于差分进化算法擅长全局优化非凸问题,不依赖梯度,避免陷入局部最优,是非线性优化的理想求解器,使基于复杂神经网络模型的预测控制变得可行。因此本文采用差分进化算法求解风电场功率调度预测控制优化问题。

注 2:若风电场功率调度预测控制优化问题不能得到可行解,去掉振动超限的机组,二次构建优化问题,再次求解。其具体流程如图 6 所示。

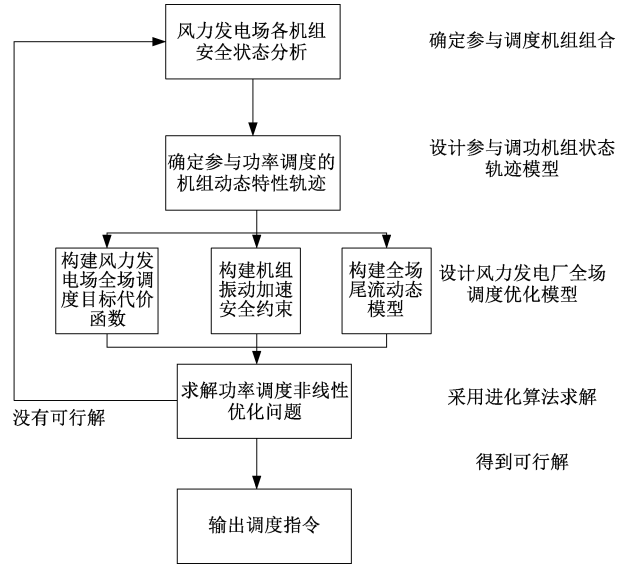


图 6 风力发电场功率可靠调度流程

Fig. 6 Reliable power dispatch process of wind farm

相应的风力发电场功率可靠调度策略描述如算法 1 所示。

3 数值实例

实验仿真基于 FAST.Farm-v3.0.0 风电场仿真平台,设置 12 台机组,采用 4×3 方式布局,如表 1 所示。

3.1 风力发电机组振动加速度预测分析

基于振动加速度预测模型,采用表 1 的模型参数设定开展模型学习和训练。基于 FAST.Farm-v3.0.0 及以上风力发电场布局,在不同扇区和不同风速及湍流下的采集各风力发电机组(OPENFAST,5 MW)运行状态数据及尾流场数据,构建训练数据集。

CNN-GRU 模型参数设定如表 2 所示,CNN 参数和 GRU 参数设定如表 3 所示。训练后 CNN-GRU 模型与机组物理模型(OPENFAST,5 MW)、CNN-LSTM 模型(long short-term memory, LSTM)、回归型支持向量机模型(support vector regression, SVR)性能比较分析,如图 7 所示。基于 CNN-GRU 模型的风力发电机组振动加速度曲线(X 方向和 Y 方向)与物理模型振动加速度曲线偏差

算法 1: 风力发电场功率调度算法

```
1 begins
2 while 调度未完成 do
    /* 步骤 1:确定参与调度机组组合 */
3 执行:“风力发电场各机组安全状态分析”;
    /* 步骤 2:设计参与功率调度机组状态轨迹模型 */
4 执行:“确定参与功率调度的机组动态特性轨迹”;
    /* 步骤 3:设计风力发电场全场调度优化模型 */
5 执行:“构建风力发电场全场调度目标代价函数”;
6 执行:“构建机组振动加速安全约束”;
7 执行:“构建全场尾流动态模型”;
    /* 步骤 4:采用进化算法求解 */
8 执行:“求解功率调度非线性优化问题”;
    /* 判断是否有可行解 */
9 if 得到可行解 then
    /* 步骤 5:输出调度指令 */
10 执行:“输出调度指令”;
11 退出循环;
12 end if
13 else
    /* 没有可行解,返回步骤 1 重新循环 */
14 return 步骤 1;
15 end if
16 end while
17 end
```

表 1 仿真实验风电场布局

Table 1 Layout of wind farm for simulation experiment

m					
NERL-5	x	y	NERL-5	x	y
MW 4×3			MW 4×3		
WD1	0	0	WD7	2 000	−300
WD2	1 000	0	WD8	3 000	−300
WD3	2 000	0	WD9	0	−600
WD4	3 000	0	WD10	1 000	−600
WD5	0	−300	WD11	2 000	−600
WD6	1 000	−300	WD12	3 000	−600

表 2 CNN-GRU 模型参数设定

Table 2 CNN-GRU model parameter settings

模型参数	取值
学习率	0.02
CNN 层数	1
Dropout 比例	0.2
训练批样本数	120
GRU 层数	16
训练次数	100

表 3 CNN 和 GRU 参数设定

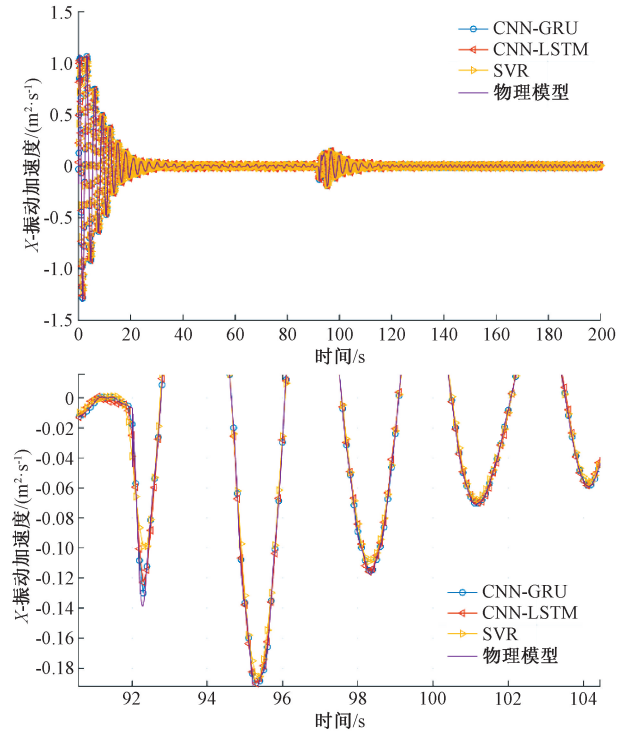
Table 3 CNN and GRU parameter settings

参数	设定
输入通道数	0.02
输出通道数	1
激活函数	ReLU
卷积核大小	3
步长	1
池化核大小	2
填充方法	Same

最小($<5\%$),基本重合,CNN-LSTM 模型、SVR 模型对应的振动加速度曲线存在较大的预测偏差。相应的性能分析如表 4 所示。

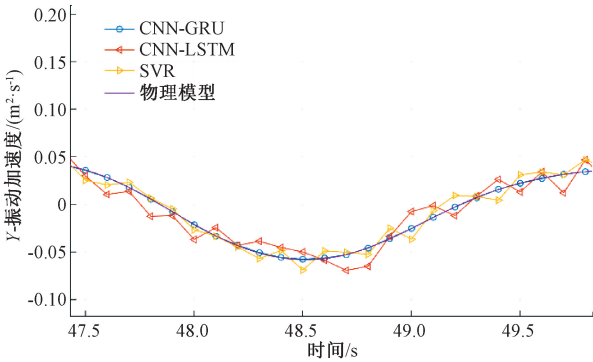
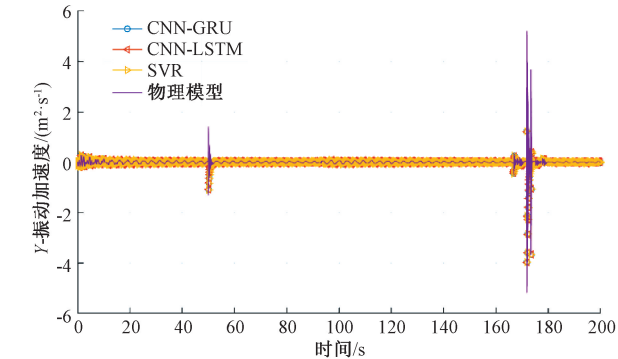
3.2 基于风力机组机舱振动预测的风电场功率可靠调度分析

风电场功率调度仿真时长 $T=200\text{ s}$,风向 0° ,风速 =



(a) X-方向振动加速度比较分析

(a) Comparative analysis of X-direction vibration acceleration



(b) Y-方向振动加速度比较分析

(b) Comparative analysis of Y-direction vibration acceleration

图 7 预测模型预测比较分析

Fig. 7 Comparative analysis of prediction from different models

表 4 预测模型性能比较分析

Table 4 Performance comparison analysis of prediction models

预测模型	MAE (平均绝对 误差)	RMSE (均方根 误差)	R (决定 系数)	ACC (预测 精度)
CNN-GRU	6.722	6.891	0.67	0.84
CNN-LSTM	12.058	12.520	0.80	0.88
SVR	12.306	12.872	0.82	0.91

15 m/s。相应预测控制策略采用预测时域长度为 20 步,步长为 1 s。动态尾流模型基于 5 MW 风力发电机组参数^[16]构建。

相应的全场功率调度预测控制优化问题采用差分优化算法求解。差分优化算法参数设置为:种群大小 $N_p=60$,染色体长度 $D=80$,迭代代数 $G=1\,000$,缩放系数 $F=0.6$,交叉系数 $CR=0.4$,惩罚系数 $\alpha=10^{20}$ 。其迭代优化过程如图 8 所示,能实现优化问题的求解收敛。

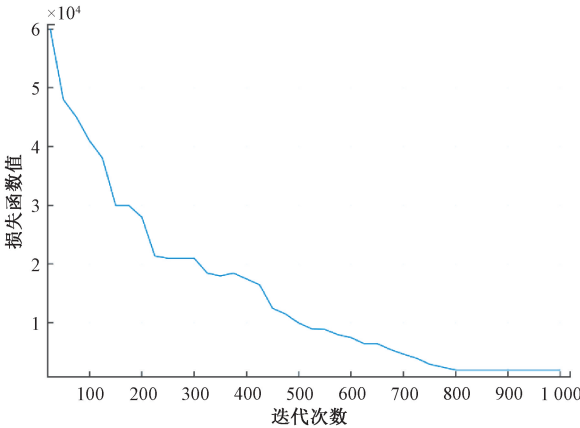


图 8 风电场功率可靠调度差分进化迭代求解过程

Fig. 8 Differential evolution iterative process for reliable power dispatch of wind farm

策略 1 为未考虑机舱加速度超限的调度方法,策略 2 为考虑机舱加速度超限的调度方法。风电场尾流分布如图 9 所示。图 9(a)策略 1 未考虑机舱加速度超限,各机组偏航角度指令为 $(15^{\circ}, 12^{\circ}, 15^{\circ}, 0^{\circ}, 15^{\circ}, 12^{\circ}, 15^{\circ}, 0^{\circ}, 15^{\circ}, 12^{\circ}, 15^{\circ}, 0^{\circ})$ 。WD7 和 WD11 机组受到上游机组(WD5、WD9)和(WD6、WD10)尾流叠加的影响,振动加速度超限,导致其不能完成对应的功率调度指令,使得风电场全场功率调

度效果较差。图 9(b)策略 2 考虑机舱加速度超限,各机组偏航角度指令为 $(15^{\circ}, 12^{\circ}, 15^{\circ}, 0^{\circ}, 15^{\circ}, 0^{\circ}, 125^{\circ}, 0^{\circ}, 15^{\circ}, 0^{\circ}, 12^{\circ}, 0^{\circ})$ 。因此在考虑 WD7 和 WD11 机舱加速度超限下,WD6 和 WD10 不再执行功率调度指令,其尾流场对下游机组 WD7 和 WD11 的气动载荷不平衡减弱,因此 WD7 和 WD11 的偏航角度减小。由于全场功率调度未考虑非安全状态机组,从而风电场全场功率调度效果较好。

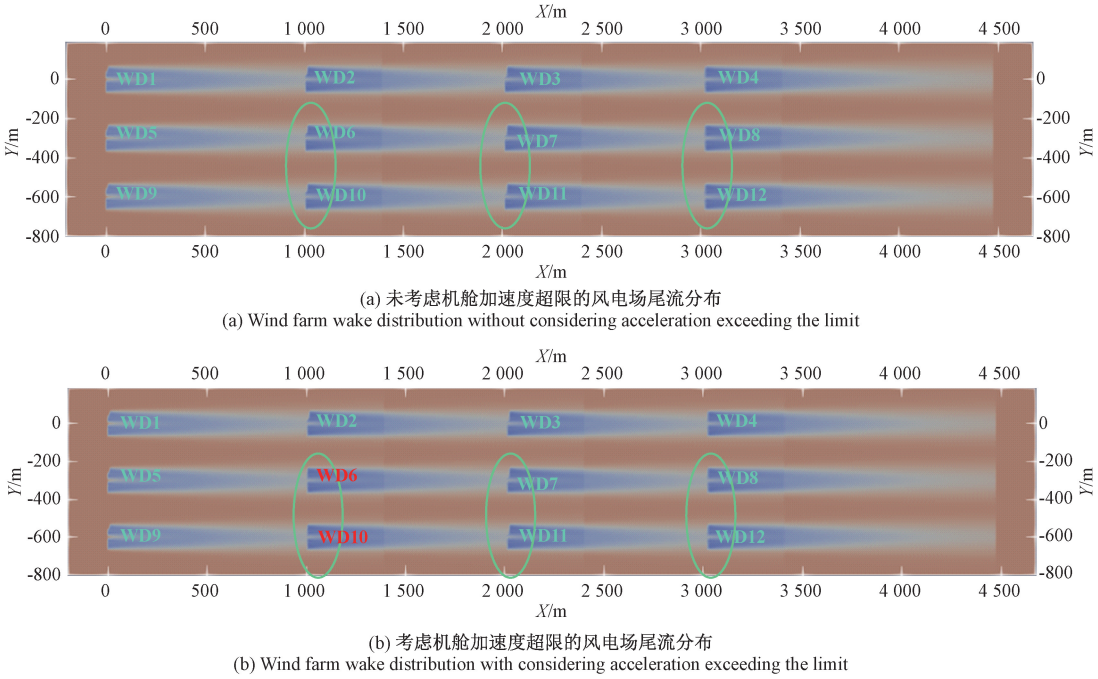
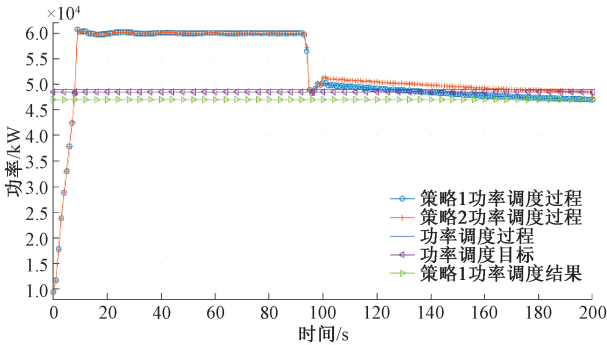


图 9 风电场尾流分布
Fig. 9 Wind farm wake distribution

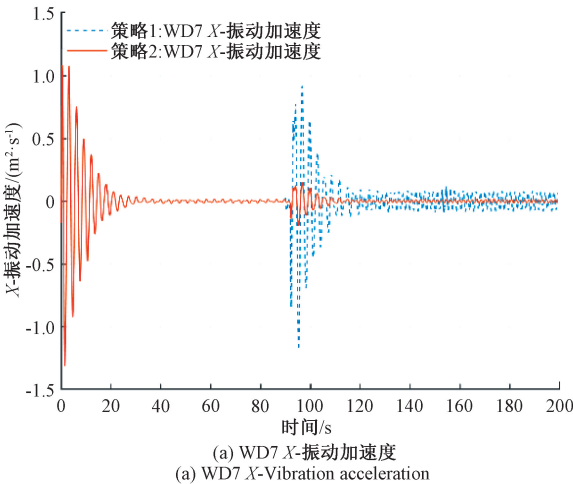
相应的风电场功率调度效果如图 10 所示。



0~90 s 之间风速 15 m/s,正西方向入风情况下,所有机组启动到额定发电状态,90 s 下达全场目标功率调度,为 49 000 kW。策略 1 调度后全场功率达到 47 000 kW,策略 2 则达到 48 400 kW。策略 2 相对策略 1 调度精度提

升 3%。

如图 11 所示,策略 2 调度下尾流场 WD7 和 WD11 的气动载荷不平衡减弱,X-振动加速度和Y-振动加速度波动明显减小。



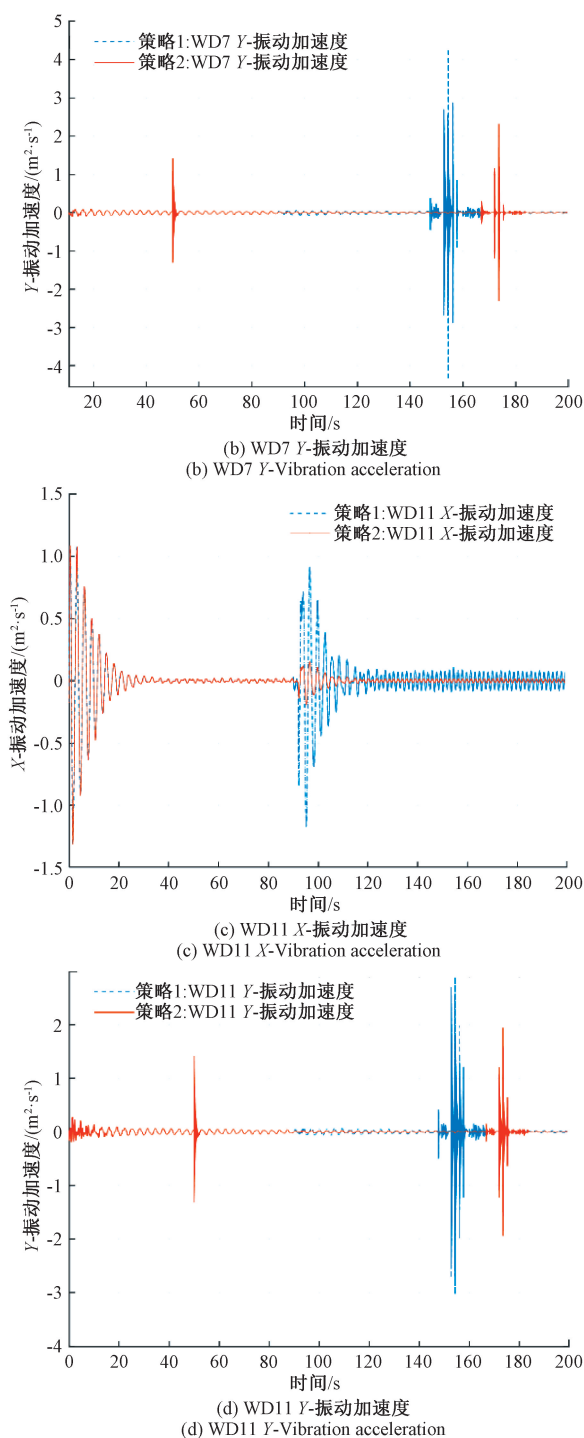


图 11 风力发电机组 WD7 和 WD11 振动加速度

Fig. 11 Vibration acceleration of wind turbine WD7 and WD11

4 结 论

本研究针对风力发电场功率可靠调度过程,提出了基于风力发电机组振动加速度预测控制调度策略。由于考虑了尾流场对风力发电机组振动加速度的影响,使得风力

发电场功率调度精度明显提升,并通过风力发电场调度仿真实验验证了方法有效性。基于此研究成果,将振动加速度与疲劳载荷联合建模,将疲劳载荷降低设计为调度目标,实现风电场多目标运行优化。

参考文献

- [1] 路朋, 叶林, 汤涌, 等. 基于模型预测控制的风电集群多时间尺度有功功率优化调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6572-6582.
LU P, YE L, TANG Y, et al. Research on multi-time-scale active power optimal dispatch strategy for wind power clusters based on model predictive control [J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(22): 6572-6582.
- [2] 武晓冬, 席鹏辉, 赵锟, 等. 基于疲劳分布的风电场有功优化调度策略[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(22): 9400-9407.
WU X D, XI P H, ZHAO K, et al. Active power optimal dispatch strategy for wind farms based on fatigue distribution [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(22): 9400-9407.
- [3] 杨伟峰, 文云峰, 李立, 等. 考虑疲劳载荷的风电场分散式频率响应策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 55-62.
YANG W F, WEN Y F, LI L, et al. Distributed frequency response strategy for wind farms considering fatigue load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 55-62.
- [4] YAO Q, MA B, ZHAO T Y, et al. Optimized active power dispatching of wind farms considering data-driven fatigue load suppression [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 14(1): 371-380.
- [5] 张彬彬, 李聪, 陈超波, 等. 基于 VMD 的风机次同步振荡模式辨识方法研究 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(14): 186-194.
ZHANG B B, LI C, CHEN C H, et al. Research on sub-synchronous oscillation mode identification method based on VMD for wind turbines [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 47(14): 186-194.
- [6] TAO T, LONG K, YANG T L, et al. Quantitative assessment on fatigue damage induced by wake effect and yaw misalignment for floating offshore wind turbines [J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 116004.
- [7] YAO Q, LIU J ZH, HU Y. Optimized active power dispatching strategy considering fatigue load of wind turbines during de-loading operation [J]. IEEE Access, 2019, 7: 17439-17449.
- [8] YANG J, ZHENG S Y, SONG D R, et al.

- Comprehensive optimization for fatigue loads of wind turbines in complex-terrain wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 909-919.
- [9] ZHANG B H, SOLTANI M, HU W H, et al. Optimized power dispatch in wind farms for power maximizing considering fatigue loads [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 862-871.
- [10] VALI M, PETROVIC V, PAO L Y, et al. Model predictive active power control for optimal structural load equalization in waked wind farms [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(1): 30-44.
- [11] 魏赏赏, 应夏融, 高岩松, 等. 限功率下基于风电机组状态评价的风电场有功优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 506-516.
- WEI SH SH, YING X R, GAO Y S, et al. Active power optimal dispatch of wind farms under power limitation based on wind turbine condition assessment [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(11): 506-516.
- [12] 王鑫, 程启明, 陈炯, 等. 基于阻抗分析法的双馈风电场并网系统的次同步振荡分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1): 133-144.
- WANG X, CHENG Q M, CHEN J, et al. Subsynchronous oscillation analysis of doubly-fed wind farm grid-connected systems based on impedance analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 133-144.
- [13] HE R Y, YANG H X, LU L. Optimal yaw strategy and fatigue analysis of wind turbines under the combined effects of wake and yaw control [J]. Applied Energy, 2023, 337: 120878.
- [14] FRANDSEN S. On the wind speed reduction in the center of large clusters of wind turbines [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1992, 39(1/3): 251-265.
- [15] QIAN G W, ISHIHARA T. A new analytical wake model for yawed wind turbines [J]. Energies, 2018, 11(3): 665.
- [16] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2009.

作者简介

刘楠(通信作者), 硕士, 副教授, 主要研究方向为智能控制技术。

E-mail: lnlwdr@163.com