

计及风电机组传动链载荷的模型预测控制 调频策略

徐大成¹, 尹纯亚¹, 周嘉阳², 李凤婷¹, 刘江山¹

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 国网江西省电力有限公司 吉安供电分公司, 江西 吉安 343400)

摘要:为抑制风电机组参与一次调频产生的疲劳载荷,基于不同风速下风电机组的机械动态响应特性及控制装置运行特性,提出了一种考虑机组疲劳载荷的一次调频策略。首先,根据并网风电机组的动态响应特性和一次调频控制装置运行特性,推导了风电机组的疲劳载荷模型;其次,构建风电机组状态空间模型,将风电机组一次调频与疲劳载荷转化为多约束多目标优化数学模型,基于模型预测控制,减小系统动态频率偏差的同时降低风电机组疲劳载荷;最后,基于 Matlab/Simulink 平台,通过时域仿真对比分析不同控制策略下的风电机组调频能力与调频产生的疲劳载荷,结果表明,相较于现有控制策略,所提控制策略可有效提高风电机组的频率响应能力和降低风电机组的疲劳载荷,延长风电机组使用寿命。

关键词:疲劳载荷;模型预测控制;一次调频;双馈风电机组

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26216

Wind Turbine Generator Transmission Chain Load-considering Model Predictive Control Frequency Regulation Strategy

XU Dacheng¹, YIN Chunya¹, ZHOU Jiayang², LI Fengting¹, LIU Jiangshan¹

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China;

2. Ji'an Power Supply Branch, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Ji'an 343400, Jiangxi, China)

Abstract: To mitigate the fatigue load generated by wind turbine participation in primary frequency regulation, a primary frequency regulation strategy considering the fatigue load of wind turbine was proposed based on the mechanical dynamic response characteristics and control device operation characteristics of wind turbine under different wind speeds. Firstly, based on the dynamic response characteristics and primary frequency regulation control device operation characteristics of grid-connected wind turbine, the fatigue load model of wind turbine was derived. Secondly, by constructing the state space model of wind turbine, the primary frequency regulation and fatigue load of wind turbine were transformed into a multi-constraint multi-objective optimization mathematical model. Based on the model predictive control (MPC), the dynamic frequency deviation was reduced while the fatigue load of wind turbine was lowered. Finally, based on the Matlab/Simulink platform, the frequency regulation capability and fatigue load of wind turbine under different control strategies were compared through time-domain simulation and analysis. The results show that the proposed control strategy is more effective than the existing control strategy in improving the frequency response capability of wind turbine and reducing the fatigue load of wind turbine, thereby extending the service life of wind turbine.

Key words: fatigue load; model predictive control (MPC); primary frequency regulation; doubly-fed induction generator (DFIG)

在“双碳”目标及新能源为主的新型电力系统建设中,风电渗透率持续上升。一方面,由于

基金项目:国家自然科学基金(5236070148);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01C363)

作者简介:徐大成(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为高比例风电系统稳定运行与控制,Email:1844958188@qq.com

通讯作者:尹纯亚(1994—),男,博士,副教授,主要研究方向为高比例新能源稳定运行与控制,Email:xjdxycy@xju.edu

风电系统本身的波动性和间歇性,使得电网中功率不平衡现象增多;变速风电机组采用电力电子器件直接与电网相连,惯量支撑能力降低,对电网的调频能力提出了巨大的挑战^[1]。另一方面,风电机组参与调频导致机械动作频繁,从而加快材料缺陷积累,疲劳载荷增加,缩短风机循环寿命^[2]。在大规模集中风电接入弱送端电网条件下,调频问题更加突出^[3-5],亟需研究降低风电机组疲劳载荷并能够确保一次调频性能的调控手段。

针对变速风电机组参与一次调频的现有研究多集中于虚拟惯量控制^[6]、基于储能装置的风电机组频率协同控制^[7]以及功率备用控制^[8]等方面。文献[9]提出正常运行时风电机组一直保持最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式运行,在中风速区通过释放转子动能参与一次调频;对于高渗透率风电系统,要求风电必须具备一次调频能力,运行在MPPT模式的风电机组转子转速达到额定值,无法提供功率备用,不能满足系统一次调频需求。文献[10]提出了综合频率调节方案,可以有效地提供频率支撑。但该方案只能改善短时频率支撑效果,且系统存在频率二次跌落风险。文献[7]提出风电机组始终运行在MPPT模式,当系统需要一次调频时,其惯性响应和一次调频任务均由超级电容完成。文献[11]提出了风电场虚拟惯量补偿策略,利用储能装置动态弥补系统调频功率的不足,解决了频率二次跌落问题。上述方案未考虑风电机组运行工况和储能装置荷电状态等因素,计算过程较为复杂,且储能装置的高成本限制了风电场一次调频能力,降低了系统频率的稳定性。文献[12-14]提出了不同工况下功率备用控制策略,结合转子的转速控制与变桨控制,使风电系统的功率达到动态平衡,但转速控制与变桨控制为机械动作,在响应一次调频时具有滞后性。文献[15]引入桨距角调频比例系数,频繁动作桨距控制,机组在实际运行中,一次调频主要是通过实时调整风电机组的输出功率,以匹配负荷需求变化,但由于变桨控制是机械动作,频繁地调节桨距角增加了机组的疲劳载荷,缩短使用寿命。文献[16]在现场测试中发现,不同的控制方法对疲劳载荷的影响有显著差异。文献[17]分析了一次调频下的能量传递路径,提出疲劳载荷的增加主要是源于一次调频下发电机转矩波动。文献[18]

采用谱密度分析和模态分析对解析方程进行了进一步分析,考察了频率响应对风机不同工况的影响,定性和定量地确定了频率响应影响机组疲劳载荷的机理。文献[19]基于风机的有功备用容量设定比例系数,用于代替传统启停机控制有功输出的策略,一定程度上可降低风电机组疲劳载荷,但该策略风机未处于MPPT模式,对风电场经济性有一定的影响。文献[20]提出了一种考虑疲劳载荷敏感性的有功控制方法,求解风电机组疲劳载荷灵敏度系数,协同控制有功出力,改善系统频率特性。目前研究主要集中在提升风电机组一次调频的性能,而如何抑制风电机组参与调频产生的疲劳载荷研究相对较少。

模型预测控制(model predictive control, MPC)是用于优化动态系统的控制策略,能够处理多变量控制问题、约束条件以及系统的不确定性。文献[21]提出了基于模型预测控制的风光储场站一次调频控制方法,提高了动态模型预测精度。文献[22]提出了一种考虑疲劳载荷的风电场多目标模型预测控制策略。以风电场输出功率跟踪电网调度指令、风电场整体塔架弯矩和主轴转矩变化量最小化以及风电场机组塔架与主轴转矩均衡化为目标,文献[23]提出了基于模型预测控制的独立变桨控制系统,利用滚动优化减小桨距角变化的同时,降低了叶片以及轮毂所受疲劳载荷。以上策略未考虑风电机组其他调频控制策略。

综上,本文提出一种计及疲劳载荷的风电机组一次调频策略。首先分析风电机组调频控制与有功控制结构,基于不同风速下的风电机组运行特性构建风电机组动态响应模型,推导风电机组疲劳载荷模型;其次,通过构建考虑疲劳载荷的双馈风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)状态空间模型,在一次调频控制策略中以风电机组疲劳载荷最小为约束,基于模型预测控制综合考虑风电机组的疲劳载荷与一次调频控制策略,旨在提升风电机组调频性能的同时,降低由于风机出力变化和调频控制策略造成的风电机组疲劳载荷,保障高比例风电系统参与调频的可靠性与经济性。

1 双馈风电机组并网系统状态空间建模

双馈风电机组主要由气动、机械及电气部分组成,其中电气部分主要包括感应发电机和变流

系统;气动、机械部分主要包括机械传动链轴系、变桨系统与风力机^[23]。通过气动、机械和电气部分各控制环节之间的相互配合,双馈风电机组将风能转化为电能,最终通过定、转子和变流器系统向电网中的负荷供电,图1所示为双馈风电机组并入交流系统示意图。

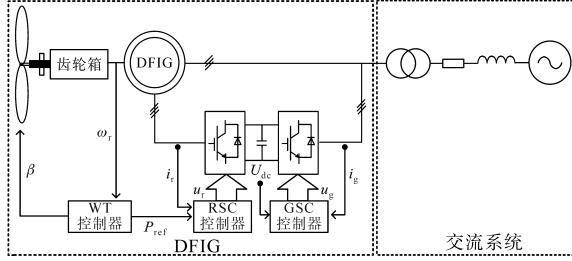


图1 双馈风电机组并入交流系统电网示意图

Fig.1 Doubly-fed induction generator integrated into an AC grid schematic diagram

1.1 双馈风电机组动态响应模型

本文对DFIG进行研究,DFIG各部分模型均在标幺值体系下建成,DFIG并联背靠背换流器并网,其结构见图1,下文将详细讲述风机动力学模型、传动链模型、发电机模型的动态响应模型以及推导过程。

1) 风电机组空气动力学中转矩方程为

$$T_a = \frac{0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p}{\omega_r} \quad (1)$$

为构建风电机组动态响应模型,将式(1)转化为增量式结构^[8]:

$$\Delta T_a = \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \Delta \omega_r + \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \quad (2)$$

式中: T_a 为风机气动转矩; ω_r 为风电机组转子转速,rad/s; v 为风速,m/s; ρ 为空气密度,kg/m³;R为转子半径,m; C_p 为功率系数; θ 为风电机组桨叶角。

2) 传动链模型。为简化控制部分模型,控制部分以单质量传动链轴系建模,风电机组以两质量传动链轴建模,控制部分的传动链模型如下:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_t} (T_a - \eta_g T_g) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \omega_g = \eta_g \omega_r \\ \Delta \omega_g = \eta_g \Delta \omega_r \end{cases} \quad (4)$$

$$J_t = J_r + \eta_g^2 J_g \quad (5)$$

$$T_s = T_a - J_r \dot{\omega}_r \quad (6)$$

式中: J_t 为等效惯量; T_g 为发电机转矩; η_g 为齿轮箱速比; ω_g 为发电机转速,rad/s; J_g 为发电机惯量,kg·m²; T_s 为传动链转矩,N·m; J_r 为转子惯量,kg·m²。

3) 发电机模型如下:

$$\begin{cases} T_g \approx \frac{P_{ref}}{\omega_g} \\ \Delta T_g = -\frac{P_{ref}}{\omega_g^2} \Delta \omega_g + \frac{1}{\omega_g} \Delta P_{ref} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{ref} 为机组功率参考值。

1.2 风电机组控制模型

通常情况下,双馈风电机组通过转速—功率最优曲线与转速—转矩曲线控制风力机转矩实现机组功率参考值 P_{ref} 与转子转速 ω_r 的定点控制,使风机达到MPPT模式。此外,通过变桨控制调节桨距角 β ,调整风力机捕获的风能,当机组功率参考值 P_{ref} 超过最大限值 P_{max} ,减小风力机捕获的能量,限制其有功功率输出^[23]。

1.2.1 MPPT控制

一般地,在中、低风速区域,为提升风电机组运行效益,通常设置风电机组桨距角为定值,存在一个最佳转速使风电机组有功输出达到峰值,此时风电机组运行在MPPT模式,如图2所示。MPPT控制的功率输出为

$$\begin{cases} P_{ref} = T_{g_ref} \omega_f \\ \Delta P_{ref} = \omega_f \Delta T_{ref} + T_{ref} \Delta \omega_f \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_{g_ref} 为发电机转矩参考值; ω_f 为发电机转速的滤波转速,为了降低传动系统扭振。

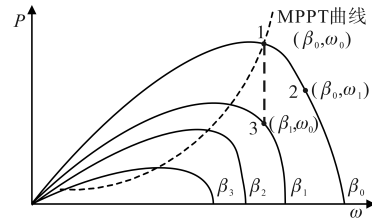


图2 风电机组输出特性

Fig.2 Wind turbine output characteristics

1.2.2 转矩控制

转矩控制中,测量风电机组的有功输出与转子转速得到功率参考跟踪特性曲线,由此计算其转速参考值,转速误差经过比例积分控制器,得到转矩基准 T_{g_ref} 。对转矩基准 T_{g_ref} 或功率输出基准 P_{dem} 附加频率下垂控制,通过调节转子转速释放动能为系统提供功率支撑。转矩基准 T_{g_ref} 及其增量计算如下:

$$\begin{cases} T_{g_ref} = \begin{cases} k_{opt} \omega_f^2 & \text{额定风速以下} \\ \frac{P_{dem}}{\omega_f} & \text{额定风速以上} \end{cases} \\ \Delta T_{g_ref} = \begin{cases} 2k_{opt} \omega_f \Delta \omega_f & \text{变桨控制不动作} \\ -\frac{P_{dem}}{\omega_f^2} \Delta \omega_f & \text{变桨控制动作} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{dem} 为机组功率输出基准值; k_{opt} 为最优转矩控制系数。

发电机转速的滤波转速 ω_f 与发电机转速 ω_g 的关系如下:

$$\omega_f = \frac{1}{\tau_f s + 1} \omega_g \quad (10)$$

式中: τ_f 为滤波时间常数。

1.2.3 功率备用控制

风电机组中的PI变桨控制方法通过改变风机的桨叶角度,调整输出功率,以提供额外的发电能力平衡系统负荷和发电量之间的差异,从而使系统频率恢复到正常水平。这种控制方法结合了比例和积分两个控制环节,以实现最佳的风能转化,提高了风电机组的性能和稳定性,主要作用于高风速情况下。桨叶角度计算如下式:

$$\theta = \frac{180}{\pi} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (\omega_f - \omega_{\text{grated}}) \quad (11)$$

式中: k_p 为PI控制的比例系数; k_i 为PI控制的积分系数; ω_{grated} 为发电机额定转速。

1.3 频率响应控制方法

风电惯量响应能迅速、高效地抑制电网频率的突变,在系统频率发生变化时释放储备的转子动能提供惯量支撑,为电网一次调频提供足够的响应时间,重新建立功率动态平衡。

风电机组惯量响应方法常规控制是虚拟惯量控制和一次调频,如下式所示:

$$P_{\text{ref0_DE}} = (1 - \gamma) P_{\text{ref}} \quad (12)$$

$$P_{\text{ref0_PFR}} = P_{\text{ref0_DE}} - k_{\text{PFR}} \Delta f \quad (13)$$

式中: $P_{\text{ref0_DE}}$ 为机组降额控制下的功率指令; γ 为调频降额因子,是通过超速控制实现的,主要作用于低、中风速时刻; $P_{\text{ref0_PFR}}$ 为机组一次调频下的功率指令; k_{PFR} 为一次调频增益; Δf 为系统频率偏差。

1.4 疲劳载荷模型

风电机组参与一次调频可提高大规模风电系统的频率响应特性,但由于风机是一种疲劳设备,在变风速情况下,不断调节有功功率输出适应频率的变化过程中,传动链转矩 T_s 波动增大,风电机组主轴将承受由有功出力变化而引起转矩不平衡导致的材料微裂纹积累,加剧了风电机组疲劳损伤,降低了风机的使用寿命。 T_s 可通过传动轴形变量 θ_s 和刚度 K_s 表示为^[8]

$$T_s = K_s \theta_s = K_s \int \omega_f - \omega_g / \eta_g dt \quad (14)$$

2 计及疲劳载荷的MPC一次调频策略

2.1 MPC控制理论

MPC是一种依赖模型的控制算法,在传统算法基础上融入多步预测滚动优化策略,不断利用反馈校正以克服外部因素干扰或预测模型误差的影响,适合应用在多变量输入输出的控制系统中,提高系统鲁棒性。模型预测控制器的基本原理可以概括为4个部分:预测模型、反馈校正、滚动优化和参考轨迹^[23]。模型预测控制基本控制结构如图3所示。

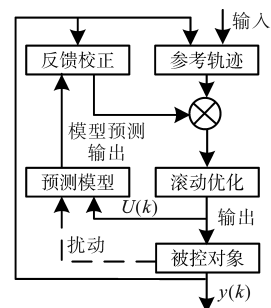


图3 模型预测控制基本结构图

Fig.3 Basic structure diagram of model predictive controll

预测模型:根据系统当前采样时刻的系统信息和模型预测系统的未来输出。

反馈校正:由于在实际过程中通常存在未知扰动和信号干扰,使得预测模型的输出和实际值存在偏差,一旦偏差较大,会导致系统不能得到预期控制目标。为此,通过两者的偏差对模型的预测值进行修正。

滚动优化:预测控制的核心在于有限时域的滚动优化,目的在每个采样时刻建立一个相对于该时间段的局部最优。

2.2 双馈风电机组状态空间方程

根据风电机组空气动力学模块与动态响应模型,在现有控制的基础上,结合风电机组的风速 v 、发电机转速 ω_g 、桨距角度 β 和机组一次调频下的功率指令 $P_{\text{ref_PFR}}$ 等状态信息,以系统频率偏差、风电机组传动链转矩变化量以及有功控制变化量最小为目标函数进行滚动优化,并将优化所得各机组设定值下发到风电机组。下一时刻检测各机组当前功率 $P_{\text{ref_DE}}$ 与功率反馈值 $P_{\text{PFR_MPC}}$,用于滚动优化。通过预测模型和约束的不断反馈、修正和更新来达到最优控制目标。图4为基于模型预测的一次调频控制框架图。

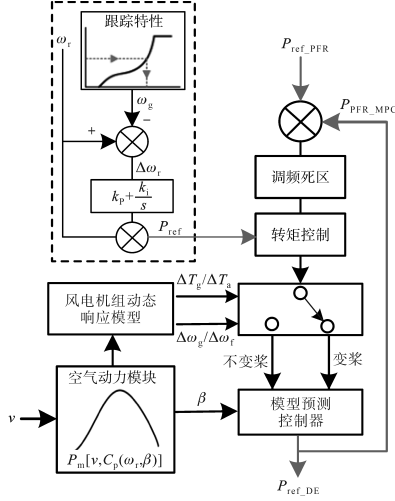


图4 一次调频控制框图

Fig.4 Block diagram of primary frequency regulation control

由图4可知:

$$P_{ref_PFR} = P_{ref_DE} - P_{PFR_MPC} \quad (15)$$

式中: P_{ref_PFR} 为风电机组参与调频后的 P_{ref} ; P_{PFR_MPC} 为模型预测控制器功率反馈值; P_{ref_DE} 为模型预测控制器输出功率值。

可得:

$$\Delta T_g = -\frac{P_{ref}}{\omega_g^2} \Delta\omega_g + \frac{1}{\omega_g} [(1-\gamma)(\omega_f 2k_{opt} \omega_f + T_{ref}) \Delta\omega_f - \Delta P_{PFR_MPC}] \quad (16)$$

$$\Delta T_g = -\frac{P_{ref}}{\omega_g^2} \Delta\omega_g + \frac{1}{\omega_g} [(1-\gamma)(T_{ref} - \omega_f \frac{P_{dem}}{\omega_f^2}) \Delta\omega_f - \Delta P_{PFR_MPC}] \quad (17)$$

在响应频率变化过程中变桨控制不动作时, ΔT_g 可表示为式(16); 变桨控制动作时, ΔT_g 可表示为式(17)。

对式(3)、式(10)、式(11)线性化后可得^[23-24]:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_t} (\Delta T_a - \eta_g \Delta T_g) \\ \Delta\dot{\omega}_f = \frac{1}{J_t} (\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \Delta\omega_r + \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \Delta\theta + \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v - \eta_g \Delta T_g) \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)、式(17)代入式(18)推导可得:

$$\Delta\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_t} (\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} + \frac{P_{ref} \eta_g^2}{\omega_g^2}) \Delta\omega_r - (1-\gamma) \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} \cdot (\omega_f 2k_{opt} \omega_f + T_{ref}) \Delta\omega_f + \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} \Delta P_{PFR_MPC} + \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\omega}_r = & \frac{1}{J_t} (\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} + \frac{P_{ref} \eta_g^2}{\omega_g^2}) \Delta\omega_r - (1-\gamma) \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} \cdot \\ & (T_{ref} - \omega_f \frac{P_{dem}}{\omega_f^2}) \Delta\omega_f + \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \Delta\theta + \\ & \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} \Delta P_{PFR_MPC} + \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \end{aligned} \quad (20)$$

在响应频率变化过程中变桨控制不动作时, $\Delta\dot{\omega}_r$ 可表示为式(19); 变桨控制动作时, $\Delta\dot{\omega}_r$ 可表示为式(20)。

将式(3)代入式(18), 可得到用于建立状态空间方程的 $\Delta\dot{\omega}_f$ 的关系式:

$$\Delta\dot{\omega}_f = \frac{\eta_g}{\tau_f} \Delta\omega_r - \frac{1}{\tau_f} \Delta\omega_f \quad (21)$$

将式(11)增量化代入式(21), 可得到变桨控制的控制量桨叶角 $\Delta\dot{\theta}$:

$$\Delta\dot{\theta} = \frac{180}{\pi} \frac{k_p \eta_g}{\tau_f} \Delta\omega_r + \frac{180}{\pi} (k_i - \frac{k_p}{\tau_f}) \Delta\omega_f \quad (22)$$

将式(18)~式(22)矩阵化, 可得到用于建立状态空间方程的控制变量:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\omega}_f \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\omega_f \\ \Delta\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_t} \frac{\eta_g^2}{\omega_g} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{PFR_MPC} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\omega}_f \\ \Delta\dot{\theta} \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\omega_f \\ \Delta\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_t} \frac{\eta_g^2}{\omega_g} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{PFR_MPC} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} (\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} + \frac{P_{ref} \eta_g^2}{\omega_g^2}) & -(1-\gamma) \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} (\omega_f 2k_{opt} \omega_f + T_{ref}) & 0 \\ \frac{\eta_g}{\tau_f} & -\frac{1}{\tau_f} & 0 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} (\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} + \frac{P_{ref} \eta_g^2}{\omega_g^2}) & -(1-\gamma) \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} (T_{ref} - \omega_f \frac{P_{dem}}{\omega_f^2}) & \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \\ \frac{\eta_g}{\tau_f} & -\frac{1}{\tau_f} & 0 \\ \frac{180}{\pi} \frac{k_p \eta_g}{\tau_f} & \frac{180}{\pi} (k_i - \frac{k_p}{\tau_f}) & 0 \end{bmatrix}$$

式(23)是变桨控制不动作情况, 式(24)是变桨控制动作情况。

由式(22)~式(24)建立风电机组的状态空间方程, 得到预测控制模型:

$$\dot{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{C} \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [\mathbf{A}_0 \quad \mathbf{A}_1]^T \quad \mathbf{B} = [\mathbf{B}_0 \quad \mathbf{B}_1]^T \quad \mathbf{C} = [\mathbf{C}_0 \quad \mathbf{C}_1]^T \\ \mathbf{A}_0 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} \left(\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} + \frac{P_{\text{ref}} \eta_g^2}{\omega_g^2} \right) & -(1-\gamma) \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} (\omega_f 2k_{\text{opt}} \omega_f + T_{\text{ref}}) & \\ \frac{\eta_g}{\tau_f} & -\frac{1}{\tau_f} & \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} \left(\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} + \frac{P_{\text{ref}} \eta_g^2}{\omega_g^2} \right) & -(1-\gamma) \frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} (T_{\text{ref}} - \omega_f \frac{P_{\text{dem}}}{\omega_f^2}) & \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \\ \frac{\eta_g}{\tau_f} & -\frac{1}{\tau_f} & 0 \\ \frac{180}{\pi} \frac{k_p \eta_g}{\tau_f} & \frac{180}{\pi} (k_i - \frac{k_p}{\tau_f}) & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_0 &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_t} \frac{\eta_g}{\omega_g} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_0 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \theta \\ \Delta \omega_f \end{bmatrix} \quad u = \Delta P_{\text{PFR_MPC}} \end{aligned}$$

设定采样周期为 T_0 , 对式(25)进行离散化后
可得采样 k 时刻的预测模型:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{J}u(k) + \mathbf{K} \quad (26)$$

其中

$$\mathbf{H} = \mathbf{e}^{A_s T_0} \quad \mathbf{J} = \int_0^{T_0} \mathbf{e}^{A_s t} \mathbf{B} dt \quad \mathbf{K} = \int_0^{T_0} \mathbf{e}^{A_s t} \mathbf{C} dt$$

式中: t_s 为参考轨迹的时间参数。

2.3 传动链转矩波动与功率参考值的关系

风电机组传动链转矩波动是指传动系统中
转矩的周期性变化或波动, 这种波动源自于输出
的不均匀性、负载变化或传动链的机械特性等因
素。传动链转矩波动通常是传输到系统中, 使其
在某些时刻接近或偏离预期的功率参考值, 对机
组疲劳载荷有显著影响, 较大的波动导致较大的
疲劳载荷, 较小的波动导致较小的疲劳载荷。这
一原理已广泛应用于先前的研究中^[25-26]。尽管不
同控制方法之间的转矩和力矩平均值相差不大,
但仍可通过最大限度地减少传动链转矩波动以
降低疲劳载荷^[27]。

将式(6)线性化, 并代入式(3)推导可得:

$$\begin{aligned} \Delta T_{s0} &= \left(\frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} - \frac{\eta_g^2 J_r}{J_t} \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_g^2} \right) \Delta \omega_r + \\ & (1-\gamma) \frac{\eta_g J_r}{J_t} \frac{1}{\omega_g} (\omega_f 2k_{\text{opt}} \omega_f + T_{\text{ref}}) \Delta \omega_f - \\ & \frac{\eta_g J_r}{\omega_g J_t} \Delta P_{\text{PFR_MPC}} + \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{s1} &= \left(\frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} - \frac{\eta_g^2 J_r}{J_t} \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_g^2} \right) \Delta \omega_r + \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \\ & (1-\gamma) \frac{\eta_g J_r}{J_t} \frac{1}{\omega_g} (T_{\text{ref}} - \omega_f \frac{P_{\text{dem}}}{\omega_f^2}) \Delta \omega_f + \\ & \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \Delta \theta - \frac{\eta_g J_r}{\omega_g J_t} \Delta P_{\text{PFR_MPC}} \end{aligned} \quad (28)$$

式中: ΔT_{s0} 为在响应频率变化过程中变桨控制不
动作时传动链转矩变化量; ΔT_{s1} 为在响应频率变
化过程中变桨控制动作时传动链转矩变化量。

式(27)、式(28)可表示为

$$\Delta T_s(k) = \mathbf{D}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}u(k) + \mathbf{G} \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= [\mathbf{D}_0 \quad \mathbf{D}_1]^T \quad \mathbf{F} = [\mathbf{F}_0 \quad \mathbf{F}_1]^T \quad \mathbf{G} = [\mathbf{G}_0 \quad \mathbf{G}_1]^T \\ \mathbf{D}_0 &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} - \frac{\eta_g^2 J_r}{J_t} \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_g^2} & (1-\gamma) \frac{\eta_g J_r}{J_t} \frac{1}{\omega_g} (\omega_f 2k_{\text{opt}} \omega_f + T_{\text{ref}}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{D}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} - \frac{\eta_g^2 J_r}{J_t} \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_g^2} & (1-\gamma) \frac{\eta_g J_r}{J_t} \frac{1}{\omega_g} (T_{\text{ref}} - \omega_f \frac{P_{\text{dem}}}{\omega_f^2}) & \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial \theta} \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}_0 &= -\frac{\eta_g J_r}{\omega_g J_t} \quad \mathbf{F}_1 = -\frac{\eta_g J_r}{\omega_g J_t} \\ \mathbf{G}_0 &= \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \quad \mathbf{G}_1 = \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v \end{aligned}$$

再代入式(25)可得:

$$\begin{aligned} \Delta T_s(k+1) &= \mathbf{D}\mathbf{x}(k+1) + \mathbf{F}u(k) + \mathbf{G} \\ &= \mathbf{D}[\mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{J}u(k) + \mathbf{K}] + \mathbf{F}u(k) + \mathbf{G} \\ &= (\mathbf{D}\mathbf{J} + \mathbf{F})u(k) + \mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{K} + \mathbf{G} \end{aligned} \quad (30)$$

设

$$\begin{cases} \mathbf{c}_1 = \mathbf{D}\mathbf{J} + \mathbf{F} \\ \mathbf{c}_2 = \mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{K} + \mathbf{G} \end{cases} \quad (31)$$

则式(30)可表示为

$$\Delta T_s(k+1) = \mathbf{c}_1 u(k) + \mathbf{c}_2 \quad (32)$$

由式(32)可知: 可以通过 $u(k)$ 调整传动链转
矩的波动。

2.4 控制目标与约束

基于前文分析, 构建约束目标函数, 以 $u(k)$
为控制量, 控制目标为传动链转矩波动最小化, 即

$$\min J[u(k)] = \sum_{k=1}^i [\Delta T_s^2(k+1) + \alpha u^2(k)] \quad (33)$$

式中: α 为目标函数权重。

控制约束需考虑惯量响应的出力范围,即

$$\text{s.t. } u(k) \in [u_{\min}, u_{\max}] \quad (34)$$

其中

$$\begin{aligned} u_{\min} &= \min(P_{\min}, P_{\max}) & u_{\max} &= \max(P_{\min}, P_{\max}) \\ P_{\min} &= k_{\text{PFR}_{\min}} \Delta f & P_{\max} &= k_{\text{PFR}_{\max}} \Delta f \\ k_{\text{PFR}_{\min}} &= 20 & k_{\text{PFR}_{\max}} &= 50 \end{aligned}$$

3 算例分析

本节采用双馈风电机组验证所提控制策略的有效性,基于 Matlab/Simulink 搭建两区域 4 机系统,如图 5 所示。仿真系统设置总装机容量 100 MW,其中火电容量 70 MW,风电场容量 30 MW,即风电渗透率约为 30%。图 5 中, G_1 为具有 6 台 5 MW 双馈发电机组的风电场, G_2, G_3, G_4 均为具有一次调频的火电厂,系统负荷为随机负荷。

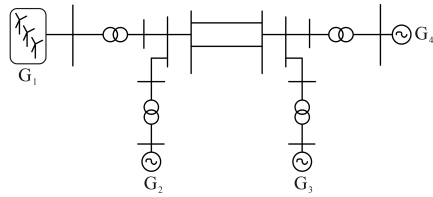


图 5 仿真系统结构图

Fig.5 Simulation system structure diagram

本文对两个场景下的系统进行仿真验证,场景设置如下:

场景 1:额定风速以下出现随机负荷波动。

场景 2:额定风速以上出现随机负荷波动。

3.1 计及疲劳载荷的模型预测控制调频方案的验证

为验证所提策略参与系统调频时的优越性与适用性,本节对两种场景进行算例分析,具体参数设置如下:变桨控制策略:备用功率控制策略(转子转速与变桨控制)预留 15% 功率裕度,利用转速—转矩曲线实现功率跟踪,下垂系数 $K_d=20$;本文所提 MPC 控制策略:模型预测控制周期 13.5 ms,随机负荷波动范围 8% 以内。疲劳载荷通常是渐进的,并且是不可逆的。风电机组进入动态调频响应过程后,材料内部微小损伤开始累积,不断调频动作,会加速疲劳的过程,且影响调频的稳定性。所以场景 1 与场景 2 选择在风电机组运行 300 s 后进行调频效果分析和疲劳载荷计算。

1) 场景 1。设风类为湍流风,平均风速约为

7 m/s,风速在额定风速以下,30 s 时系统发生随机负荷波动,此时系统偏离额定频率(50 Hz)。图 6 为额定风速以下随机负荷波动时频率变化和风机运行特性。图 6a~图 6c 分别为系统频率偏差、风电机组传动链转矩、风电机组转子转速的仿真波形。表 1 列出了额定风速以下不同控制策略频率偏差的最值点。

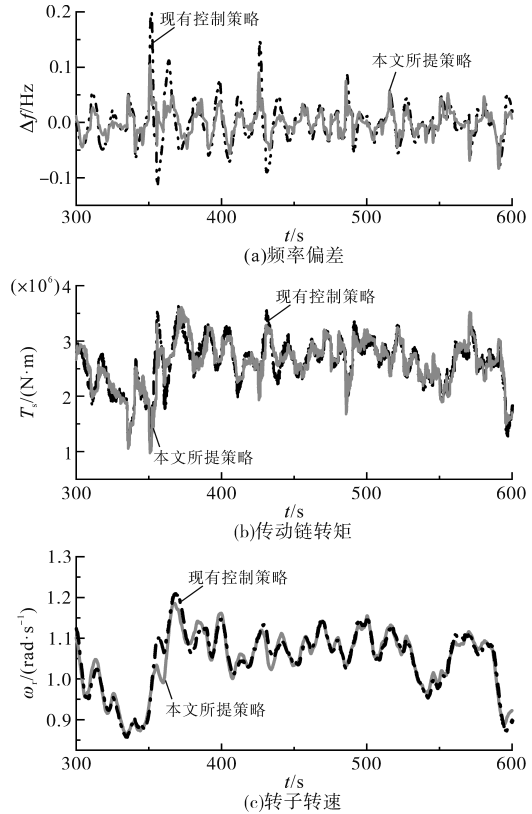


图 6 额定风速以下随机负荷波动时频率变化和风机运行特性

Fig.6 Frequency variation and wind turbine operation characteristics under random load fluctuations below rated wind speed

表 1 额定风速下不同控制策略频率偏差最值点

Tab.1 Extreme points of frequency deviation under different control strategies below rated wind speed

	频率偏差 最大值/Hz	频率偏差 最小值/Hz	频率偏差 平均值/Hz
现有控制策略	0.204	0.178	0.029 06
本文所提策略	0.092 4	0.089 7	0.017 66

由图 6 a 和表 1 可知,系统出现随机负荷波动时,风电一次调频现有控制与本文所提控制策略系统的频率变化最大值点分别约为 0.204 Hz, 0.092 4 Hz;最小值点分别约为 0.178 Hz, 0.089 7 Hz。显然,两种控制均可改善系统频率变化极值点,但本文所提控制策略在系统动态变化过程中可提供较大的有功功率,更有利于频率恢复。

由图 6b、图 6c 可见,本文所提控制策略下的

风电机组传动链转矩小于现有控制策略下的传动链转矩,转子转速也略低于现有控制策略,并且两者皆滞后到达极值点。由此可见,本文所提控制策略可以降低风电机组的响应时间,提前改变风机出力,缩短调频响应时间;同时,在整个扰动及后续响应过程中本文所提策略机组传动链转矩 T_e 变化率和最值均优于现有控制策略,有利于机组疲劳寿命的提升。

2)场景2。设风类为湍流风,平均风速约为15 m/s,风速在额定风速以上,30 s时系统发生随机负荷波动,此时系统频率偏离额定频率(50 Hz),进入调频动态响应过程。图7为额定风速以上随机负荷波动时频率变化和风机运行特性。图7a~图7d分别为系统频率偏差、风电机组传动链转矩、风电机组转子转速、桨距角的仿真波形。表2列出了额定风速以上不同控制策略频率偏差的最值点。

由图7a和表2可知,系统出现随机负荷波动

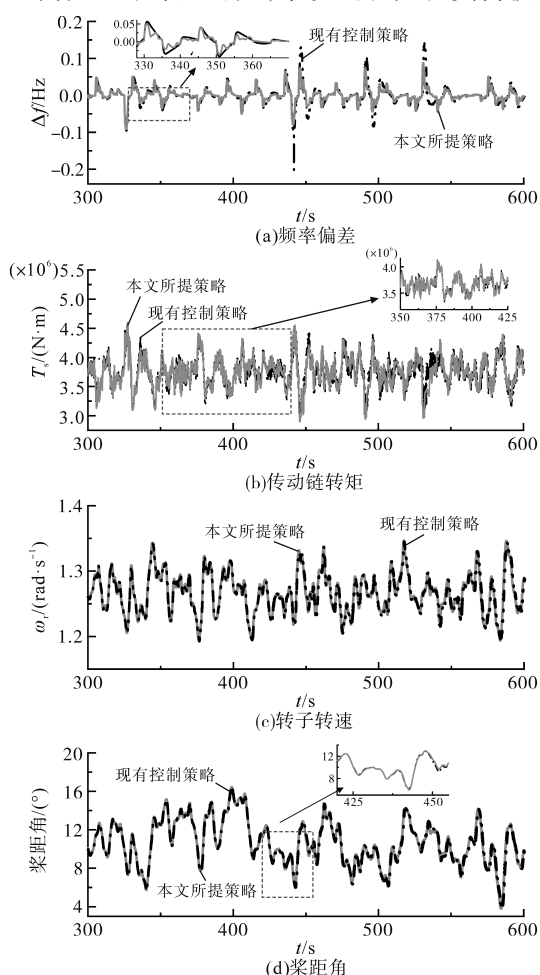


图7 额定风速以上随机负荷波动时频率变化和风机运行特性
Fig.7 Frequency variation and wind turbine operation characteristics under random load fluctuations above rated wind speed

时,风电一次调频现有控制与本文所提策略系统频率变化的最大值点分别约为0.142 1 Hz,0.087 4 Hz;最小值点分别约为-0.202 Hz,-0.079 7 Hz。在额定风速以上时,由于风电机组的输出功率增大,系统出现随机负荷波动时会使系统频率偏差幅度增大,而采用本文所提策略在发生随机负荷波动时频率变化偏差远小于现有控制,维持了风电系统频率的稳定。

在此工况下,图7b中本文所提策略机组传动链转矩始终低于现有控制,减小了机组的疲劳载荷;图7c和图7d中机组转子转速和桨距角两者几乎一致,变化幅度很小。因为在高风速情况下,转子转速达到最大额定值,改变风机出力只能依靠桨距角机械动作改变风机出力,由此可知本文所提策略只是微调转矩控制策略,对风电机组的转子转速和桨距角不产生影响,即对机组的气动特性不会造成影响。

表2 额定风速上不同控制策略频率偏差最值点

Tab.2 Extreme points of frequency deviation under different control strategies above rated wind speed

	频率偏差 最大值/Hz	频率偏差 最小值/Hz	频率偏差 平均值/Hz
现有控制策略	0.142 1	-0.202	$-1.246 4 \times 10^{-4}$
本文所提策略	0.087 4	-0.079 7	-6.9×10^{-5}

3.2 基于调频控制策略下的疲劳载荷分析

基于Matlab编程对比分析现有调频控制与本文所提策略对机组疲劳载荷的影响。

1)场景1。图8是额定风速以下两种控制策略对机组疲劳载荷的影响。由图可见,本文所提控制策略相较于现有控制传动链转矩 T_e 的波动幅度明显下降,有效减缓风电机组传动链转矩的波动;通过对机组 T_e 进行疲劳载荷的累计雨流周期分析,本文所提策略每5 min的雨流计数均小于现有控制策略,这说明在额定风速以下本文所提策略对风电机组的 T_e 具有一定的优化作用,降低了系统的疲劳载荷。

2)场景2。图9是额定风速以上两种控制策略对机组疲劳载荷的影响。当处于额定风速以上时,转子转速达到额定值,此时风电机组采用变桨控制响应系统频率的变化。图9中,风类为湍流风,平均风速为15 m/s,由于在高风速且波动较大时,变桨机构为机械部件,响应具有滞后性,且风机疲劳损伤增加,尤其是对传动链转矩 T_e 的影响较大。通过对 T_e 疲劳载荷的累计雨流周期

分析可得,本文所提策略每5 min的雨流计数曲线下降趋势远快于现有控制,这说明所提控制策略的疲劳载荷均值较小,具有一定的优化作用。

综合两个场景下的控制策略对比,本文所提策略能够有效利用风电机组参与一次调频,满足风电系统在多种工况下的一次调频要求,同时降低风电机组提供频率支撑时的疲劳载荷,延长使用寿命,增加经济效益。

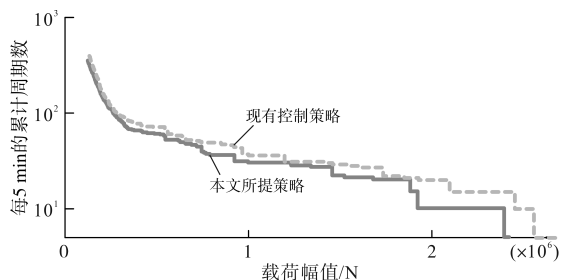


图8 额定风速以下疲劳累积雨流循环对比

Fig.8 Cumulative rainflow cycle of fatigue at below wind speed

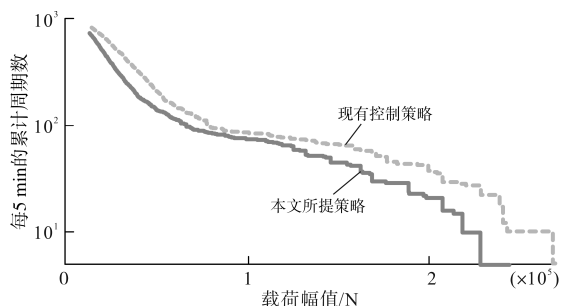


图9 额定风速以上疲劳累积雨流循环对比

Fig.9 Cumulative rainflow cycle of fatigue at above wind speed

4 结论

针对风电机组参与一次调频时疲劳载荷增加问题,本文提出了一种计及机组疲劳载荷的模型预测控制一次调频策略,得出如下结论:

1)在不同风况下,面对电网频率变化时,所提策略在不改变风机整体气动性能的前提下,具有超短期提前响应能力,能够提供有效的频率支撑,提高了风电新能源系统一次调频的有效性和可预测性。

2)风电机组在参与一次调频时,会产生疲劳载荷,通过对现有控制策略与所提控制策略的疲劳累积雨流周期的仿真分析,结果表明,所提控制策略有利于降低风电机组参与一次调频时的疲劳载荷,延长风机使用寿命。

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.

ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. 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.

[2] 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 Weifeng, WEN Yunfeng, LI Li, et al. Decentralized frequency response strategy for wind farm considering fatigue load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 55-62.

[3] 王晓东,曹国胜,刘颖明,等. 双馈风电机组动态虚拟惯量和阻尼模糊自适应控制策略研究[J]. 太阳能学报,2023,44(9):356-365.

WANG Xiaodong, CAO Guosheng, LIU Yingming, et al. Research on fuzzy adaptive control strategy of dynamic virtual inertia and damping of doubly-fed wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9): 356-365.

[4] 张梅,李少林,李丹,等. 东北电网风电惯量及一次调频实测与分析[J]. 电网技术,2022,46(4):1624-1631.

ZHANG Mei, LI Shaolin, LI Dan, et al. Measurement and analysis of wind power inertia response and primary frequency regulation characteristics in Northeast China power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1624-1631.

[5] 李和明,张祥宇,王毅,等. 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):32-39,188.

LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39, 188.

[6] 马德智,栗文义,温彩凤,等. 基于双馈发电机组调频参与度的风/储协调一次调频控制策略[J]. 电网技术,2023,47(3):968-979.

MA Dezhi, LI Wenyi, WEN Caifeng, et al. Wind/storage coordinated primary frequency regulation control strategy based on participation level of DFIG units[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 968-979.

[7] 刘洪波,彭晓宇,张崇,等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):81-92.

LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.

[8] 彭海涛,何山,袁至,等. 基于改进转子转速和桨距角协调控制的变速风电机组一次调频策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(9):87-94.

PENG Haitao, HE Shan, YUAN Zhi, et al. Primary frequency regulation strategy for variable-speed wind turbines based on improved coordinated control of rotor speed and pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 87-94.

[9] WU Y K, YANG W H, HU Y L, et al. Frequency regulation at a

- wind farm using time-varying inertia and droop controls[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 213–224.
- [10] 颜湘武, 崔森, 常文斐. 考虑储能自适应调节的双馈感应发电机一次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1027–1039.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, CHANG Wenfei. Primary frequency regulation control strategy of doubly-fed induction generator considering supercapacitor SOC feedback adaptive adjustment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1027–1039.
- [11] 隗霖捷, 王德林, 李芸, 等. 基于可变系数的双馈风电机组与同步发电机协调调频策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 94–100.
- WEI Linjie, WANG Delin, LI Yun, et al. Variable coefficient based coordinated frequency modulation strategy between DFIG-based wind turbine and synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 94–100.
- [12] YANG P, HE B, WANG B, et al. Coordinated control of rotor kinetic energy and pitch angle for large-scale doubly fed induction generators participating in system primary frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(8): 1836–1847.
- [13] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706–4716.
- FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706–4716.
- [14] 唐坚, 苏剑涛, 姚禹歌, 等. 面向新型电力系统的风电调频技术分析[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 1–8.
- TANG Jian, SU Jiantao, YAO Yuge, et al. Technical analysis of power system frequency regulation by wind power for new power system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(7): 1–8.
- [15] FENG G D, AVID S. A spectral model of grid frequency for assessing the impact of inertia response on wind turbine dynamics [J]. Energies, 2021, 14(9): 2492–2492.
- [16] XU Z W, GENG H, CHU B. A hierarchical data-driven wind farm power optimization approach using stochastic projected simplex method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3560–3569.
- [17] 陈谦. 储能辅助风电机组调频的控制策略研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023.
- CHEN Qian. Research on the control strategy of energy storage auxiliary wind turbines for frequency adjustment[D]. Enshi: Hubei University for Nationalities, 2023.
- [18] WANG Yingwei, GUO Yufeng, XU Weimao. Impact mechanism of frequency response on wind turbine fatigue load[J]. Renewable Sustainable Energy, 2023, 15(3): 033304.
- [19] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758–3771.
- CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. A review of key technologies for large-scale offshore wind power transmission and grid connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758–3771.
- [20] 赵洪山, 李自立. 风电机组轴系的剩余寿命预估[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 70–75, 99.
- ZHAO Hongshan, LI Zili. Prognosis of remaining lifetime of wind turbine unit shafting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 70–75, 99.
- [21] 张啸笛. 基于模型预测控制的风光储场站级一次调频控制方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- ZHANG Xiaodi. Primary frequency modulation control method of wind and landscape storage station based on model predictive control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [22] 丁奕程. 考虑疲劳载荷的风电场多目标模型预测控制策略[D]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- DING Yicheng. Multi-objective model predictive control strategy for wind farm considering fatigue load[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024.
- [23] 张天翼. 风力发电系统模型预测变桨距控制策略研究[D]. 保定: 河北大学, 2024.
- ZHANG Tianyi. Research on model prediction variable pitch control strategy of wind power system[D]. Baoding: Hebei University, 2024.
- [24] KNUDSEN T, BAK T, SVENSTRUP M. Survey of wind farm control power and fatigue optimization[J]. Wind Energy, 2015, 18(8): 1333–1351.
- [25] GLOE A, JAUCH C, CRACIUN B, et al. Influence of continuous provision of synthetic inertia on the mechanical loads of a wind turbine[J]. Energies, 2021, 14: 5185.
- [26] GAO D W, WU Z, YAN W, et al. A comprehensive frequency regulation scheme for permanent magnet synchronous generator-based wind turbine generation system[J]. IET Renewable Power Gener, 2019, 13(2): 234–244.
- [27] WU Z, GAO W, WANG X, et al. Improved inertial control for permanent magnet synchronous generator wind turbine generators[J]. IET Renewable Power Gener, 2016, 10(9): 1366–1373.
- [28] WANG X, GAO D W, WANG J, et al. Implementations and evaluations of wind turbine inertial controls with fast and digital real-time simulations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1805–1814.
- [29] ZHAO H R, WU Q W, HUANG S J. Fatigue load sensitivity-based optimal active power dispatch for wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1247–1259.

收稿日期: 2024–10–11

修改稿日期: 2024–11–12