

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240414

风电机组一次调频对载荷的影响分析及综合惯量 控制优化方法研究

刘军, 全哲辰

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 风电机组参与一次调频期间会产生附加机械载荷, 影响机组安全稳定运行。为明确风电机组参与一次调频对机械载荷的影响机制, 建立了含综合惯量控制的风电机组机械结构动力学模型, 分析了综合惯量控制对叶片、塔架及传动轴系载荷的影响。针对风电机组参与一次调频会激发传动轴扭振和塔架侧向振动的问题, 首先, 在综合惯量控制的基础上, 提出了根据风电机组转速和频率变化动态调节虚拟惯量系数和下垂系数的方法, 提升风电机组的调频性能。其次, 提出了基于转矩补偿的扭振抑制策略, 提高轴系的等效阻尼和等效刚度。搭建了基于OpenFAST和Matlab的风电机组机电耦合仿真模型。仿真结果表明, 所提策略提升风电机组频率支撑能力的同时, 减小了调频过程中传动轴和塔架的附加机械载荷。

关键词: 风电机组; 调频控制; 频率支撑; 机械载荷; 载荷分析; 轴系扭振

Analysis of the impact of wind turbine generator primary frequency regulation on mechanical loads and research on an integrated inertia control optimization method

LIU Jun, QUAN Zhechen

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: During the participation of wind turbine generators (WTGs) in primary frequency regulation, additional mechanical loads will be generated, affecting the safe and stable operation of the wind turbine. To clarify the impact mechanism of wind turbine participation in frequency regulation on mechanical loads, a mechanical structure dynamic model of WTGs containing integrated inertia control is established, and the influence of integrated inertia control on blade, tower and drivetrain loads is analyzed. Looking at torsional vibration of the drive shaft and lateral vibration of the tower excited by wind turbine participation in frequency regulation, first, using integrated inertia control, a method of dynamically adjusting the virtual inertia coefficient and droop coefficient according to the changes of wind turbine speed and frequency is proposed to improve the frequency regulation performance of WTGs. Secondly, a torsional vibration suppression strategy based on torque compensation is proposed to increase the equivalent damping and equivalent stiffness of the drivetrain. An electromechanical coupling simulation model of WTGs based on OpenFAST and Matlab is built. The results show that the proposed strategy can not only improve the frequency support capability of WTGs, but also reduce the additional mechanical loads on the drivetrain and tower during the frequency regulation process.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2021GY-106).

Key words: wind turbine; frequency regulation; frequency support; mechanical load; load analysis; torsional vibration

0 引言

随着我国“双碳”目标的推进, 风电产业迅速

发展, 风电正逐步成为我国构建新型电力系统的重要能源之一^[1-4]。然而, 风电机组转子转速与系统频率的解耦特性导致其无法主动响应系统频率变化, 风电接入比例的持续攀升削弱了电力系统等效惯量, 系统频率的稳定性面临着严峻挑战^[5-8]。因此, 大规模风电主动进行频率支撑是保障电力系统安

基金项目: 陕西省重点研发计划项目资助(2021GY-106); 陕西省教育厅科研项目资助(JK725)

全运行的必然选择^[9-11]。

目前, 关于风电机组调频控制技术的研 究主要集中在为电力系统提供惯量响应和一次调频^[12-14]。通常将系统频率偏差、频率变化率等指标引入风电机组的有功控制系统中, 当系统频率发生突变时, 通过控制转子转速来释放或吸收风力机旋转动能, 风电机组能够在短时间内快速增加或减少有功功率, 为电力系统提供频率支撑作用^[5-6]。

风电机组包含许多机械部件, 在参与电力系统一次调频期间, 快速的有功功率变化会导致机械部件承受较大的载荷, 进而加快疲劳载荷的快速累积, 降低机组的运行寿命^[13]。文献[15]搭建了基于 Matlab 与 Bladed 的仿真模型, 分析了调频对风电机组机械部件载荷和疲劳载荷的影响, 结果表明风电机组调频控制期间载荷变化更加剧烈, 容易引起机械部件的疲劳损伤。文献[16]采用 OpenFAST 和 Matlab 的仿真模型, 分析了虚拟惯量控制对直驱式永磁同步风电机组机械载荷的影响, 结果表明虚拟惯量控制会显著增大传动轴载荷以及塔架载荷。文献[17]则分析了虚拟惯量控制对风电机组传动轴的影响, 通过建立含虚拟惯量控制的风电机组小信号模型, 研究了不同虚拟惯量系数对传动轴扭振的影响。文献[18]通过推导引入虚拟惯量控制后风电机组电磁转矩与转子转速之间的传递函数, 分析了虚拟惯量控制导致风电机组传动轴系扭振阻尼降低的原因。

为减小风电机组参与系统调频产生的附加载荷, 文献[19]提出了基于转子转速和桨距角的一次调频协调控制策略, 在全风况下预留一定的备用容量, 并通过整定静态调差系数和桨距角调差系数, 兼顾提升风电机组的频率支撑能力和降低机械载荷。文献[20]提出了一种最优辅助控制策略, 以疲劳载荷灵敏度及调频功率作为约束条件, 以风电机组传动轴扭矩和塔架弯矩的变化量最小化为目标进行优化求解, 其求解结果作为风电机组的最优调频功率, 从而降低风电机组参与调频期间的疲劳载荷。文献[21]提出了一种多通道自适应模型预测控制, 利用模型预测控制在线优化机组载荷, 以减轻传动轴主轴扭矩。文献[22]利用指数函数趋近的方法调整风电机组转速恢复期间的功率调节系数, 通过改变转速恢复期间的参考功率, 降低风电机组传动轴系载荷。文献[23]在风电场频率响应控制层采用多目标模型预测控制的方法, 将各个机组的疲劳载荷作为约束条件, 在维持风电场调频能力的同时, 实现风电场内机组疲劳载荷的协同优化。

风电机组参与系统调频会产生附加机械载荷的

原因是机械部件的振动特性发生了改变。已有研究中, 部分研究通过软件工具模拟了风电机组的载荷响应结果^[15-16]; 部分研究则分析了虚拟惯量控制对传动轴系扭振的影响机理^[17-18], 但未考虑叶片、塔架的振动特性。总体而言, 从机理上分析风电机组参与系统一次调频对叶片、塔架和传动轴系等关键机械部件载荷的影响, 仍有待进一步研究。此外, 风电机组参与系统调频需要较快的响应速度, 目前许多文献提出的控制策略包含复杂的运算过程^[20-23], 对风电机组调频控制的实时性提出了更高的要求。

综上, 本文以双馈风电机组为例, 从叶片、塔架和传动轴系振动特性的角度出发, 围绕风电机组参与系统一次调频期间对机械载荷的影响展开研究, 首先推导了双馈风电机组含综合惯量控制的机械结构动力学方程, 分析了综合惯量控制对叶片、塔架和传动轴系载荷的影响; 其次, 提出了一种动态调节综合惯量控制参数的方法, 根据风力机角速度动态调节虚拟惯量系数, 提升风电机组的惯量响应能力, 根据调频阶段平滑减小下垂系数, 避免较大的载荷冲击和频率二次跌落; 采用基于转矩补偿的扭振抑制策略为传动轴提供电气阻尼和电气刚度, 从而抑制风电机组参与调频过程引起的传动轴扭振和塔架侧向振动。最后, 通过 OpenFAST 和 Matlab 的联合仿真模型验证了所提策略的有效性。

1 双馈风电机组模型及综合惯量控制

双馈风电机组是包含许多机械部件和电气控制的复杂发电系统, 通过对转子侧和电网侧变频器的控制可实现发电机的变速恒频运行, 将风能转化为电能输送至电网, 图 1 所示为双馈风力发电系统示意图。为最大程度地捕获风能, 通常根据风速大小控制风力机的转速, 使风电机组运行在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制模式。

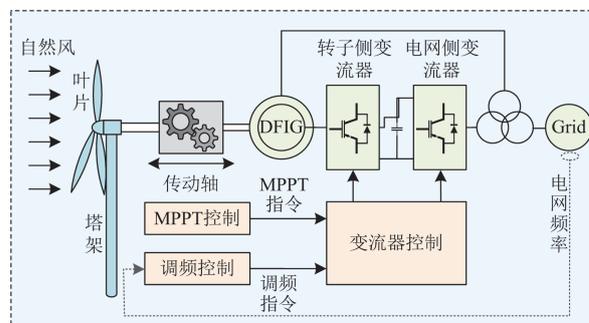


图 1 双馈风力发电系统示意图

Fig. 1 Schematic structure of doubly-fed wind power generation system

1.1 双馈风电机组数学模型

根据空气动力学原理，风力机捕获的机械功率 P_m 为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中： ρ 为空气密度； R 为风轮半径； v 为风速； $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数； β 为桨距角； λ 为叶尖速比， $\lambda = \omega_m R/v$ ，其中 ω_m 为风力机角速度。

风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 与叶尖速比 λ 和桨距角 β 有关。当叶尖速比 λ 一定时，增大桨距角 β ，风能利用系数 C_p 随之减小；当桨距角 β 一定时，存在一个最优叶尖速比 λ_{opt} ，使风能利用系数有最大值 C_{p-max} 。通常在额定风速以下时，为最大程度地捕获风能，根据风速大小调节风力机角速度使叶尖速比始终保持为 λ_{opt} 。

风电机组传动轴系的低速轴与风力机连接，高速轴与发电机转子连接。传动轴系采用等效两质量块传动轴模型^[24]，其表达式为

$$\begin{cases} J_m \dot{\omega}_m = T_m - T_s \\ J_r \dot{\omega}_r = \frac{T_s}{N_g} - T_e \\ T_s = K_d \theta_s + C_d \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_s = \omega_m - \frac{\omega_r}{N_g} \end{cases} \quad (2)$$

式中： J_m 、 J_r 分别为风力机、发电机转动惯量； T_m 、 T_s 、 T_e 分别为风力机机械转矩、传动轴转矩、发电机电磁转矩； ω_r 为发电机角速度； N_g 为齿轮箱变速比； K_d 、 C_d 分别为低速轴刚度系数、阻尼系数； θ_s 为轴系扭转角。

若假定风力机与发电机之间为刚性连接，则式(2)可简化为单质量块传动轴模型，如式(3)所示。

$$\begin{cases} J_w \omega_m = T_m - N_g T_e \\ J_w = J_m + N_g^2 J_r \end{cases} \quad (3)$$

式中， J_w 为折算到低速轴的等效转动惯量。

忽略变流器电磁动态过程，并假定发电机输出功率能够准确无延迟地跟随功率参考指令^[25]，则发电机模型可描述为

$$P_e = P_{ref} \quad (4)$$

式中： P_e 为风电机组输出功率； P_{ref} 为风电机组参考功率指令。

1.2 综合惯量控制

目前，风电机组参与系统一次调频的控制方式

主要为功率备用控制和转子动能控制。功率备用控制是一种间接调频方式，它通过超速减载或变桨减载预留一定的备用容量，通常与转子动能控制配合参与系统调频，为系统提供更多的有功出力；转子动能控制根据系统频率变化控制风电机组输出功率，是一种直接调频方式。转子动能控制又分为虚拟惯量控制、下垂控制及综合惯量控制等，其中综合惯量控制结合了虚拟惯量控制和下垂控制，兼顾风电机组的惯量响应和一次调频^[4,7-8]。因此，为了更加全面地分析风电机组参与一次调频对机械载荷的影响，本文以综合惯量控制作为机组的调频控制方式。

风电机组采用如图 2 所示的综合惯量控制结构，图中： T_{e-ref} 为电磁转矩参考值； ω_{m-opt} 为 MPPT 风力机角速度指令； P_{opt} 为 MPPT 功率指令； P_f 为调频功率指令； f 、 f_{rate} 分别为系统频率、额定频率； Δf 为系统频率偏差； K_I 、 K_D 分别为虚拟惯量系数、下垂系数。图中红色虚线框内为风电机组 MPPT 控制结构，实现最大风能跟踪控制；黑色虚线框内为综合惯量控制结构图，实现调频控制。

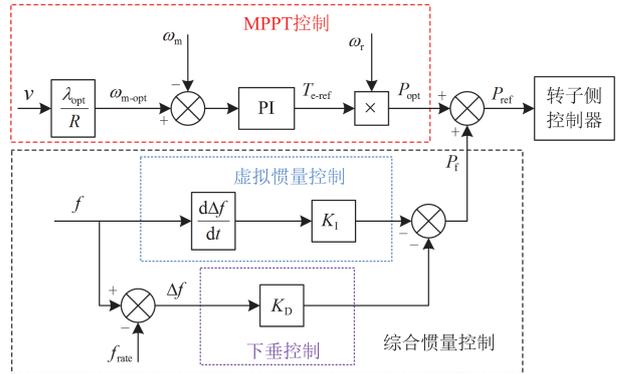


图 2 综合惯量控制结构图

Fig. 2 Structure diagram of integrated inertia control

从图 2 可以看出，综合惯量控制包括虚拟惯量控制和下垂控制，其根据频率变化率、频率偏差得到调频功率指令，与 MPPT 功率指令叠加后作为风电机组参考功率指令。虚拟惯量控制能够抑制系统频率变化，改善风电机组的“零惯量”特性，下垂控制则模拟了同步发电机的有功功率-频率特性，综合惯量控制则是将二者的调频特性相结合，使风电机组具备惯量响应及一次调频能力。根据图 2，得到综合惯量控制的调频功率指令为

$$P_f = -K_I \frac{df}{dt} - K_D \Delta f \quad (5)$$

1.3 风电机组机械结构动力学方程

风电机组的叶片、塔架、传动轴系均为柔性部

件, 会因风电机组控制模式、风速等因素而发生振动, 从而对机组运行的稳定性和安全性产生不利影响^[26-27]。为此, 本文选取叶片挥舞、叶片摆振、塔架侧向、塔架俯仰以及低速轴旋转 5 个关键运动模态进行建模。

风电机组模态之间彼此关联、相互耦合, 具有高度非线性特征, 为了简化模型, 仅考虑各模态的一阶振型, 并采用泰勒级数展开方法对上述 5 个运动模态的动力学方程进行线性化, 可得到如式(6)所示的方程。

$$M\Delta\ddot{q} + C\Delta\dot{q} + K\Delta q = F \quad (6)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵, 均为常数矩阵, 矩阵中的元素分别为叶片、塔架、传动轴的质量系数、阻尼系数和刚度系数, 为对应机械部件的固有参数, 矩阵中的元素含义可参考文献[28]; “ Δ ”表示各模态在运行点附近的微小摄动; Δq 为各模态运动位移或旋转角度的增量矩阵, $\Delta q = [\Delta q_{b1} \ \Delta q_{b2} \ \Delta q_{t1} \ \Delta q_{t2} \ \Delta q_r]^T$, Δq_{b1} 、 Δq_{b2} 分别为叶片挥舞、摆振模态, Δq_{t1} 、 Δq_{t2} 分别为塔架侧向、俯仰模态, Δq_r 为低速轴系旋转模态; $\Delta\dot{q}$ 为各模态运动速度或旋转角速度的增量矩阵; $\Delta\ddot{q}$ 为各模态运动加速度或旋转角加速度的增量矩阵; F 为作用于各模态的激励矩阵。

此外, 传动轴系旋转模态用于分析叶片与塔架模态的动态特性, 为简便起见, 在线性化动力学方程中采用单质量块模型。其中激励矩阵 F 表示为

$$F = \begin{bmatrix} \Delta F_{Aero1} \\ \Delta F_{Aero2} \\ \eta(\Delta T_m - N_g \Delta T_e) + \Delta F_{Thrust1} \\ \Delta F_{Thrust2} \\ \Delta T_m - N_g \Delta T_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: F_{Aero1} 、 F_{Aero2} 分别为叶片挥舞方向、叶片摆振方向的气动推力; η 为塔架侧向模态运动受传动轴扭转振动影响系数; $F_{Thrust1}$ 、 $F_{Thrust2}$ 分别为塔架侧向、塔架俯仰方向气动推力; F_{Aero1} 、 F_{Aero2} 、 $F_{Thrust1}$ 、 $F_{Thrust2}$ 、 T_m 均为风速、风电机组角速度、桨距角的非线性函数。

由于在额定风速以下时桨距角保持为 0° , 因此 F 中各元素可表示为

$$\begin{cases} \Delta F_{Aero1} = \zeta_{Aero1} \Delta v + \gamma_{Aero1} \Delta \omega_m \\ \Delta F_{Aero2} = \zeta_{Aero2} \Delta v + \gamma_{Aero2} \Delta \omega_m \\ \Delta F_{Thrust1} = \zeta_{Thrust1} \Delta v + \gamma_{Thrust1} \Delta \omega_m \\ \Delta F_{Thrust2} = \zeta_{Thrust2} \Delta v + \gamma_{Thrust2} \Delta \omega_m \\ \Delta T_m = \zeta_m \Delta v + \gamma_m \Delta \omega_m \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δv 、 $\Delta \omega_m$ 分别为风速、风电机组角速度的增量; 符号“ ζ ”、“ γ ”分别表示 F_{Aero1} 、 F_{Aero2} 、 $F_{Thrust1}$ 、 $F_{Thrust2}$ 、 T_m 在运行点附近一阶泰勒展开后风速、风电机组角速度增量对应的系数。

为简化风电机组机械部件的线性化动力学方程, 将式(8)代入式(7)中, 并与式(6)整合, 得到风电机组叶片、塔架及传动轴的动力学方程为

$$M\Delta\ddot{q} + C\Delta\dot{q} + K\Delta q = \zeta \Delta v + \gamma \Delta \omega_m + \mu \Delta T_e \quad (9)$$

式中:

$$\begin{cases} \zeta = [\zeta_{Aero1} \ \zeta_{Aero2} \ \eta\zeta_m + \zeta_{Thrust1} \ \zeta_{Thrust2} \ \zeta_m]^T \\ \gamma = [\gamma_{Aero1} \ \gamma_{Aero2} \ \eta\gamma_m + \gamma_{Thrust1} \ \gamma_{Thrust2} \ \gamma_m]^T \\ \mu = [0 \ 0 \ -\eta N_g \ 0 \ -N_g]^T \\ \Delta v = [\Delta v] \\ \Delta \omega_m = [\Delta \omega_m] \\ \Delta T_e = [\Delta T_e] \end{cases} \quad (10)$$

2 风电机组一次调频对载荷的影响分析

风电机组参与系统调频时, 有功功率快速变化将对机组叶片、塔架、传动轴的载荷产生较大的影响。为此, 本节通过分析风电机组参与系统调频时的机电耦合特性, 揭示综合惯量控制对风电机组载荷特性的影响。

2.1 综合惯量控制对机械载荷的影响

风电机组通过综合惯量控制参与调频时发电机电磁功率会发生突变, 而发电机电磁转矩与电磁功率直接相关。根据式(9)可以看出, 发电机电磁转矩为连接电气系统与机械部件的关键变量。在分析参与系统调频时风电机组电磁功率-电磁转矩-运动模态的耦合特性时, 作如下假定:

- 1) 忽略随机风速扰动, 风速保持恒定;
- 2) 风电机组具备充足的备用容量参与调频;
- 3) 风电机组参与调频前一刻处于稳定运行状态, 传动轴系两端转矩平衡。

由于风速恒定, 风电机组在 MPPT 模式运行, 功率指令恒定, 功率指令增量 $\Delta P_{ref} = 0$ 。系统频率突变时, 风电机组输出功率会根据调频功率指令发生变化, 在进行线性化后可得风电机组调频功率指令增量 ΔP_f 为

$$\Delta P_f = -K_1 \frac{d\Delta f}{dt} - K_D \Delta f \quad (11)$$

根据式(4), 发电机输出功率能够准确跟踪参考功率指令, 因此, 在参与调频期间发电机电磁功率增量 ΔP_e 为

$$\Delta P_e = \Delta P_{ref} + \Delta P_f = -K_1 \frac{d\Delta f}{dt} - K_D \Delta f \quad (12)$$

由于发电机输出的电磁功率与电磁转矩及发电机角速度之间的关系为 $P_e = T_e \omega_r$ ，则线性化后的电磁转矩的增量可表示为

$$\Delta T_e = \frac{P_{e0}}{\omega_{r0}^2} \Delta \omega_r - \frac{1}{\omega_{r0}} \Delta P_e \quad (13)$$

式中，角标“0”表示风电机组对应变量的稳态运行值。

在风力机与发电机之间刚性连接的前提下，发电机转速与风力机转速之间的关系为 $\omega_r = N_g \omega_m$ 。结合式(12)和式(13)可得参与调频期间发电机电磁转矩的增量表达式为

$$\Delta T_e = \frac{N_g P_{e0}}{\omega_{r0}^2} \Delta \omega_m + \frac{K_I}{\omega_{r0}} \cdot \frac{d\Delta f}{dt} + \frac{K_D}{\omega_{r0}} \Delta f \quad (14)$$

将式(14)代入式(9)后可以得到参与调频期间风电机组叶片、塔架和传动轴的动力学方程为

$$M\Delta\dot{q} + C\Delta\dot{q} + K\Delta q = \zeta\Delta v + \gamma'\Delta\omega_m + \lambda_1\Delta\dot{f} + \lambda_2\Delta f \quad (15)$$

式中：

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma' = \left[\gamma_{Aero1} \quad \gamma_{Aero2} \quad \eta \left(\gamma_m - \frac{N_g^2 P_{e0}}{\omega_{r0}^2} \right) + \gamma_{Thrust1} \right. \\ \left. \gamma_{Thrust2} \quad \gamma_m - \frac{N_g^2 P_{e0}}{\omega_{r0}^2} \right]^T \\ \lambda_1 = \left[0 \quad 0 \quad -\eta \frac{N_g K_I}{\omega_{r0}} \quad 0 \quad -\frac{N_g K_I}{\omega_{r0}} \right]^T \\ \lambda_2 = \left[0 \quad 0 \quad -\eta \frac{N_g K_D}{\omega_{r0}} \quad 0 \quad -\frac{N_g K_D}{\omega_{r0}} \right]^T \\ \Delta\dot{f} = \left[\frac{d\Delta f}{dt} \right] \\ \Delta f = [\Delta f] \end{array} \right. \quad (16)$$

由式(15)可以看出，风电机组参与系统调频过程中，风电机组机械部件的动力学方程出现了频率扰动项 $\lambda_1\Delta\dot{f}$ 和 $\lambda_2\Delta f$ ，下面分别从系数矩阵 λ_1 和 λ_2 以及频率扰动项 $\Delta\dot{f}$ 和 Δf 两个方面分析风电机组参与系统调频对机械载荷的影响。

1) 系数矩阵 λ_1 和 λ_2 中仅有对应塔架侧向模态和低速轴系旋转模态的项不为 0，可见风电机组调频会激发低速轴系扭振和塔架侧向振动，导致传动轴系和塔架承受了额外的冲击载荷。此外， λ_1 和 λ_2 相应项的大小受虚拟惯量系数 K_I 、下垂系数 K_D 和发电机初始转速 ω_{r0} 影响，且与 K_I 、 K_D 呈正比，与 ω_{r0} 呈反比。当初始转速 ω_{r0} 一定时， λ_1 和 λ_2 相应项将随着 K_I 和 K_D 的增大而增大，因此，传动轴系扭振和塔架侧向振动也越剧烈。

2) 在风速恒定条件下，风速扰动 $\Delta v = 0$ ，叶片、塔架及传动轴的振动仅受频率扰动项 $\Delta\dot{f}$ 和 Δf 的

影响。发生频率扰动后，扰动源 $\Delta\dot{f}$ 和 Δf 将进一步激发传动轴系扭振及塔架侧向振动，且这一特征持续到系统频率恢复稳态时。分别考察 $\Delta\dot{f}$ 和 Δf 对塔架及传动轴振动特性的扰动过程，具有如下特点：调频初始时刻， $\Delta\dot{f}$ 较大，因此会加剧低速轴系和塔架侧向振动，直至系统频率偏差达到最大后结束； Δf 的变化趋势较缓，但仍会增加传动轴系扭振和塔架侧向振动，直至调频结束。

综上，可得风电机组参与系统调频对机械载荷的影响过程，如图 3 所示。发生频率扰动后，风电机组通过综合惯量控制进行频率支撑，风电机组参考功率发生改变，进而改变电磁转矩，导致传动轴系扭振和塔架侧向振动。并且增大 K_I 和 K_D 会加剧传动轴扭振与塔架侧向振动。

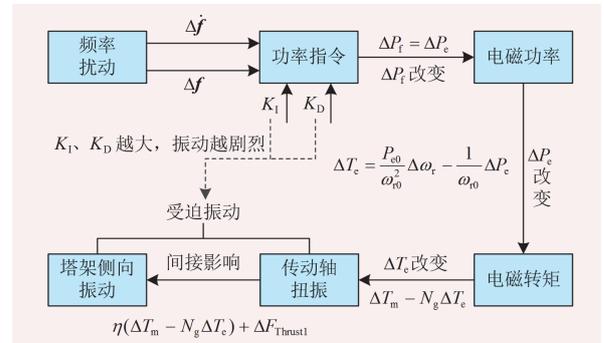


图 3 风电机组参与调频对机械载荷的影响过程

Fig. 3 Process of wind turbine participation in frequency regulation on mechanical loads

2.2 风电机组参与调频对传动轴扭振的影响

当作用在风电机组传动轴上的机械转矩与电磁转矩不平衡时，会引起传动轴的扭振，并间接引起塔架侧向振动。为进一步探究风电机组参与调频对传动轴扭振的影响，本节利用两质量块模型进行分析。首先，对式(2)进行化简，得到传动轴系的动力学方程，如式(17)所示。

$$J_m J_r \ddot{\theta}_s + (C_d J_w / N_g^2) \dot{\theta}_s + (K_d J_w / N_g^2) \theta_s = J_m J_r + T_e J_m / N_g \quad (17)$$

在风速恒定的前提下，传动轴扭振仅受到频率支撑控制时电磁转矩变化的影响。同样地，对式(17)进行线性化处理，由于频率扰动前传动轴系转矩平衡，即 $\Delta T_m = 0$ ，据此可建立轴系扭转角小扰动量 $\Delta\theta_s$ 与电磁转矩小扰动量 ΔT_e 之间的传递函数 $G_{T_e}(s)$ ，如式(18)所示。

$$G_{T_e}(s) = \frac{J_m / N_g}{J_m J_r s^2 + (C_d J_w / N_g^2) s + (K_d J_w / N_g^2)} \quad (18)$$

参照表 1 给出的 5 MW 风电机组主要参数, 可得传动轴系的固有谐振频率 f_s 为 2.23 Hz, 固有阻尼比 ζ_s 为 0.0503。可见, 传动轴系是二阶欠阻尼系统, 当风电机组参与系统一次调频时, 电磁转矩的突变极易激发传动轴系扭振。

表 1 5 MW 风电机组主要参数

Table 1 Main parameters of 5 MW wind turbine

基本参数	数值	基本参数	数值
额定功率/MW	5	额定风速/(m/s)	11.4
风轮半径/m	63	齿轮箱变速比	97
风力机转动惯量/ (kg·m ²)	3.54×10 ⁷	发电机转动惯量/ (kg·m ²)	534.12
风力机额定转速/ (rad/s)	1.2671	发电机额定转速/ (rad/s)	122.91
低速轴等效刚度/ (N·m/rad)	8.67×10 ⁸	低速轴等效阻尼/ (N·m·s/rad)	6.22×10 ⁶

进一步地, 结合式(14)和式(18), 得到以 $\Delta\omega_m$ 、 $d\Delta f/dt$ 、 Δf 为输入, $\Delta\theta_s$ 为输出的传递函数矩阵, 如式(19)所示。

$$[\Delta\theta_s(s)] = \begin{bmatrix} \frac{J_m P_{c0}/\omega_{r0}^2}{D_{Te}(s)} \\ \frac{J_m K_I/N_g \omega_{r0}}{D_{Te}(s)} \\ \frac{J_m K_D/N_g \omega_{r0}}{D_{Te}(s)} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta\omega_m(s) \\ d\Delta f/dt(s) \\ \Delta f(s) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $D_{Te}(s) = J_m J_r s^2 + (C_d J_w/N_g^2)s + (K_d J_w/N_g^2)$ 。

式(19)表明, 在初始转速 ω_{r0} 一定时, $\Delta\theta_s$ 的幅值与 K_I 和 K_D 的大小有关, 增大 K_I 或 K_D 会增大 $\Delta\theta_s$; $d\Delta f/dt$ 和 Δf 在机组参与系统调频的不同阶段分别向 $\Delta\theta_s$ 施加干扰, 进而加剧轴系扭振, 这与 2.1 节的结论一致。

3 风电机组综合惯量控制优化方法

本节提出一种综合惯量控制优化方法, 该方法包含综合惯量控制参数调节和基于转矩补偿的传动轴扭振抑制策略两个部分, 旨在发挥风电机组调频性能的同时, 减小参与调频期间风电机组传动轴系和塔架的冲击载荷。

3.1 综合惯量控制参数调节

通过上面分析可知, 风电机组参与系统调频过程中, 虚拟惯量系数 K_I 和下垂系数 K_D 对传动轴扭振和塔架侧向振动产生了较大的影响, 为保证风电机组具备良好的频率支撑能力, 并防止对风电机组传动轴系产生过大的冲击载荷, 在风电机组参与调

频的过程中, 对常规综合惯量控制中的 K_I 和 K_D 进行动态调节。

1) K_I 调节

与同步发电机组固有惯量相比, 风电机组可通过设置 K_I 实现对风电机组惯量的控制。从能量释放的角度看, 风电机组惯量控制的能量来自风力机转子的旋转动能, 风力机可释放的旋转动能 ΔE_w 为

$$\Delta E_w = \frac{1}{2} J_w (\omega_m^2 - \omega_{m-\min}^2) \quad (20)$$

式中, $\omega_{m-\min}$ 为风力机角速度下限, 取值为 0.7 p.u.。

风力机旋转动能反映了风电机组的惯量响应能力。以频率突降为例, 为充分发挥风电机组惯量响应能力, 根据风力机旋转动能大小动态地调节 K_I , 计算方法如式(21)所示。

$$K_I = K_{I0} \cdot \frac{\Delta E_w}{\Delta E_{w0}} = K_{I0} \cdot \frac{\omega_m^2 - \omega_{m-\min}^2}{\omega_{m0}^2 - \omega_{m-\min}^2} \quad (21)$$

式中: K_{I0} 为虚拟惯量系数的初始设定值; ΔE_{w0} 为初始调频时风电机组可释放的旋转动能; ω_{m0} 为初始调频时风力机角速度。

式(21)中, 虚拟惯量系数 K_I 会随着风电机组转速 ω_m 的降低而减小, $(\omega_m^2 - \omega_{m-\min}^2)/(\omega_{m0}^2 - \omega_{m-\min}^2)$ 项实时地反映了当前可释放旋转动能较初始旋转动能的减少程度, 通过该项动态调节虚拟惯量系数 K_I , 能够更加合理地利用风力机旋转动能, 提升风电机组的惯量响应能力。

2) K_D 调节

下垂控制使风电机组具备类似同步发电机组的静态调差特性, 与同步发电机组调节原动机的方式不同, 风电机组仍然是依靠旋转动能提供频率支撑作用。与虚拟惯量控制类似, 下垂控制同样会降低风力机转速, 当风力机转速超出其下限后风电机组将退出调频, 一方面, 退出调频将对机械部件带来一定的冲击载荷, 另一方面, 退出调频后进入转速恢复过程, 易引起频率二次跌落, 对系统带来不利影响。因此, 在频率偏差达到最大值后应使 K_D 平缓地下降至 0, 从而使风电机组调频功率逐步地减小至 0。本文采用正弦函数作为 K_D 的趋近函数, 计算方法如式(22)所示。

$$K_{D0} = \begin{cases} K_{D0}, & t_0 \leq t < t_{nadir} \\ K_{D0} \cdot \frac{\left(1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{t - t_{nadir}}{t_{end} - t_{nadir}} \cdot \pi\right)\right)}{2}, & t_{nadir} \leq t \leq t_{end} \end{cases} \quad (22)$$

式中: K_{D0} 为下垂系数的初始设定值; t_0 为初始调

频时刻； t_{nadir} 为系统最大频率偏差时刻； t_{end} 为一次调频结束时刻，本文取 30 s。

由式(22)可以看出，在 t_0 至 t_{nadir} 内下垂系数为 K_{D0} ，在 t_{nadir} 之后，系统频率开始恢复， K_D 将平滑地降低至 0，从而避免转速恢复过程中系统频率二次跌落的风险。

3.2 基于转矩补偿的传动轴扭振抑制策略

风电机组参与系统调频会加剧传动轴扭振，并间接增加塔架侧向振动。为此，提出一种基于转矩补偿的传动轴扭振抑制策略，将风力机角速度与发电机角速度的偏差作为转矩补偿控制的输入信号，通过 PI 控制器调节后得到转矩补偿量，并与 MPPT 控制的电磁转矩相叠加，得到补偿后的电磁转矩参考值。图 4 为基于转矩补偿的系统控制结构图，图中， T_e^{comp} 为补偿转矩。

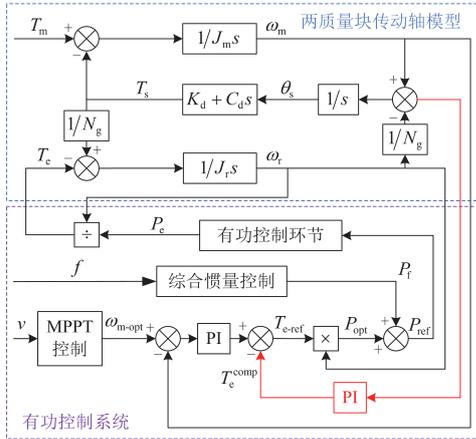


图 4 基于转矩补偿的系统控制框图

Fig. 4 System control structure diagram based on torque compensation

由图 4 可以看出，转矩补偿控制是在风电机组原有转速控制回路中对电磁转矩指令进行修正，其中补偿转矩可表示为

$$T_e^{comp} = K_{ps} \left(\omega_m - \frac{\omega_r}{N_g} \right) + K_{is} \int \left(\omega_m - \frac{\omega_r}{N_g} \right) dt \quad (23)$$

式中， K_{ps} 和 K_{is} 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数。

在风电机组输出功率能够准确跟随功率参考指令的前提下，可认为电磁转矩准确跟随其参考指令，即 $T_e = T_{e-ref}$ 。于是，可以得到转矩补偿后传动轴扭转角与电磁转矩之间的闭环传递函数 $G'_{Te}(s)$ 为

$$G'_{Te}(s) = \frac{J_m/N_g}{J_m J_r s^2 + (C_d J_w/N_g^2 + K_{ps})s + (K_d J_w/N_g^2 + K_{is})} \quad (24)$$

此时传动轴系的阻尼比为

$$\xi'_s = \frac{C_d J_w/N_g^2 + K_{ps}}{2\sqrt{K_d J_w/N_g^2 + K_{is}}} \quad (25)$$

式中， ξ'_s 为转矩补偿后的传动轴系阻尼比。

根据式(24)可得比例系数 K_{ps} 和积分系数 K_{is} 逐渐增加时 $G'_{Te}(s)$ 的幅频特性，如图 5 所示。从图 5 可以看出， K_{is} 不变，增大 K_{ps} 能够增加轴系阻尼，减小传动轴系的谐振峰值； K_{ps} 不变，增大 K_{is} ，能够增加轴系谐振频率并降低传动轴扭转角振幅，可见， K_{ps} 和 K_{is} 起到了为传动轴系提供电气阻尼和电气刚度的作用，增强了轴系的等效阻尼和等效刚度。

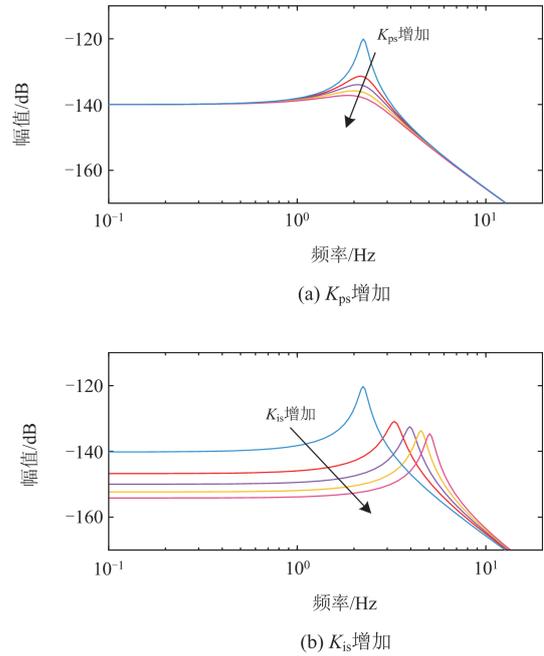


图 5 K_{ps} 和 K_{is} 对传动轴系幅频特性的影响

Fig. 5 Effect of K_{ps} and K_{is} on the amplitude-frequency characteristics of the drivetrain shaft system

为获取合理的 K_{ps} 和 K_{is} ，保证基于转矩补偿的传动轴扭振抑制策略具有较好的扭振抑制效果，可通过优化传动轴系阻尼比的方式获取最优的 K_{ps} 和 K_{is} 。将阻尼比 ξ'_s 设定在 0.3~0.707 之间，建立如式(26)所示的目标函数。

$$\begin{cases} \max J = \frac{C_d J_w/N_g^2 + K_{ps}}{2\sqrt{K_d J_w/N_g^2 + K_{is}}} \\ 0.3 \leq \xi'_s \leq 0.707 \end{cases} \quad (26)$$

此外，由于转矩补偿控制会降低机组发电量，因此将其限制在额定电磁转矩的 2% 以内，即有如

式(27)所示的约束条件。

$$T_e^{\text{comp}} \leq 2\%T_{e\text{-rate}} \quad (27)$$

式中, $T_{e\text{-rate}}$ 为额定电磁转矩。

式(26)中 K_{ps} 和 K_{is} 的解并不唯一, 可通过以下方式灵活选取: 通过图 5 的分析可知, 增大 K_{ps} 能够增加电气阻尼, 增加轴系谐振频率; 增大 K_{is} 能够增加电气刚度, 减小轴系扭转角振幅, 因此在满足式(27)的条件下首先选择较大的 K_{ps} 作为最优值, 其次增大 K_{is} 对 ξ'_s 进行修正, 确保 ξ'_s 在 0.3~0.707 之间, 最终得到初步整定值 K_{ps0} 和 K_{is0} 。

风电机组在参与系统调频期间, $d\Delta f/dt$ 和 Δf 是变化的, 因此应根据频率响应的不同阶段适当地改变 K_{ps} 和 K_{is} 。由前文分析可知, 在惯量响应阶段, $d\Delta f/dt$ 会引起电磁转矩突变, 给传动轴带来较大的冲击载荷, 此阶段内应选择 K_{ps} 和 K_{is} 的初步整定值, 增加对轴系扭振的抑制能力; 惯量响应结束后, 下垂系数 K_D 平滑下降为零, 冲击载荷减小, 此阶段内可减小 K_{ps} 和 K_{is} , 避免过度的转矩补偿对机组发电量的影响。根据上述分析, 可将 K_{ps} 和 K_{is} 分别设置为

$$K_{ps} = \begin{cases} K_{ps0}, & t_0 \leq t < t_{\text{nadir}} \\ K_{ps0} \frac{P_{f\text{-nadir}}}{P_{f\text{-max}}}, & t_{\text{nadir}} \leq t \leq t_{\text{end}} \end{cases} \quad (28)$$

$$K_{is} = \begin{cases} K_{is0}, & t_0 \leq t < t_{\text{nadir}} \\ K_{is0} \frac{P_{f\text{-nadir}}}{P_{f\text{-max}}}, & t_{\text{nadir}} \leq t \leq t_{\text{end}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $P_{f\text{-nadir}}$ 为频率最低点对应的调频功率; $P_{f\text{-max}}$ 为 $t_0 \sim t_{\text{nadir}}$ 时间段内的最大调频功率。

4 仿真实验

4.1 仿真模型

为了验证本文所提策略的有效性, 搭建了基于 OpenFAST 与 Matlab/Simulink 的风电机组联合仿真模型, 其结构如图 6 所示。其中, 在 OpenFAST 中搭建风电机组机械结构动力学模型, 在 Matlab/Simulink 中搭建风电机组的电气模块、控制系统以及并网模型, 并通过 OpenFAST 提供的通信接口实现与 Matlab/Simulink 之间的数据互相传递。此外, 采用符合 IEC 风速模型标准的 TurbSim 程序包模拟湍流风速。

分别在两个场景下进行仿真分析, 其中场景 1 采用 9 m/s 的恒定风速, 场景 2 采用 C 类级别的湍

流风速, 平均风速为 9 m/s。分别对比无频率控制、常规综合惯量控制、综合惯量控制参数调节策略以及综合惯量控制参数调节和转矩补偿的联合控制策略, 以下简称无频率控制、传统策略、策略 1 和策略 2。仿真时间设置为 200 s, 在 100 s 时接入大小为 0.1 p.u. 的负荷 ΔP_L 。

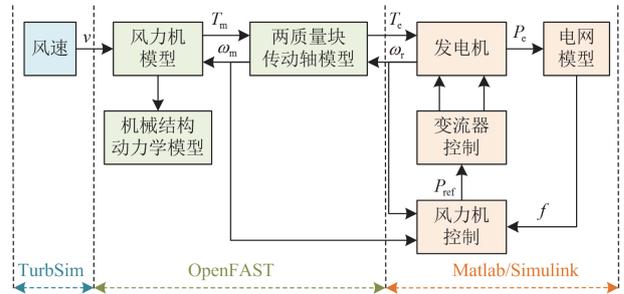


图 6 风电机组联合仿真模型结构

Fig. 6 Structure of the wind turbine co-simulation model

4.2 恒定风速下的仿真分析

场景 1 的系统频率、风电机组输出功率以及转子转速曲线如图 7 所示。由系统频率和有功功率的仿真结果可以看出, 负荷突增导致电力系统出现了较大的频率跌落, 策略 1 使系统频率最低点得到明显提高, 机组有功出力更多; 策略 2 由于采用了基于转矩补偿的控制策略, 使机组有功出力出现了轻微降低, 系统频率最低点略低于策略 1, 但仍能表现出较好的调频能力; 相比之下传统策略并未取得较好的频率支撑效果。转速仿真结果表明, 突增负荷后机组通过释放风力机旋转动能为系统提供频率支撑, 策略 1 和策略 2 均采用调频参数优化方法, 在系统频率初始跌落时以调节虚拟惯量系数为主, 下垂系数保持恒定, 由于转速下降, 风力机旋转动能减少, 虚拟惯量系数将持续降低, 随着系统频率达到最低点, 惯量响应结束, 风电机组将仅由下垂控制参与系统一次调频, 频率恢复过程中下垂系数将平滑地降低至 0, 转子转速很快恢复至参与调频前的状态, 可见, 策略 1 和策略 2 可以避免频率二次跌落。相比之下, 传统策略未能有效利用风力机旋转动能, 风电机组的转速恢复时间较长, 系统频率二次跌落的风险增加。与传统策略相比, 采用动态调节调频参数的方法在系统频率跌落时能够快速释放风力机旋转动能, 随着系统频率的恢复又能够及时减缓释放旋转动能, 提升频率最低点并加快频率恢复的同时不会过度释放风力机旋转动能。

场景 1 的风电机组机械载荷响应曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出, 频率初始跌落时系统频率变化率较大, 调频功率瞬间增大, 从而引起电磁转矩的

突变, 导致传动轴系机械转矩和电磁转矩的不平衡, 传动轴扭矩瞬间增加并持续振荡, 受到传动轴扭振影响, 塔架侧向弯矩幅值突增, 随着系统频率调节的进行, 传动轴扭矩和塔架侧向弯矩的幅值逐渐减小。

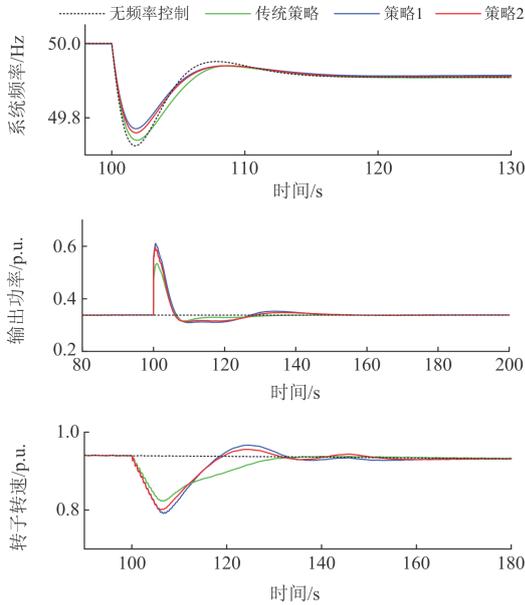


图7 场景1中系统频率、输出功率及转子转速曲线

Fig. 7 System frequency, output power and rotor speed curves in scene 1

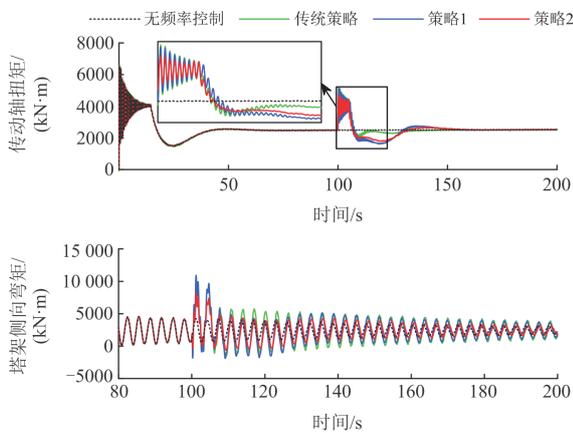


图8 场景1的机械载荷响应曲线

Fig. 8 Mechanical load response curve for scene 1

在调频过程中, 传统策略和策略1下传动轴和塔架均承受了较大的冲击载荷; 策略2采用转矩补偿的方式, 在系统频率初始跌落时, 选取较大的比例系数和积分系数为轴系增加电气阻尼和电气刚度, 有效减小了传动轴扭矩和塔架侧向弯矩的振荡幅值。从传动轴扭矩的响应曲线可以看出, 在系统频率恢复过程中策略1和策略2下的传动轴扭矩存

在轻微的振荡, 而策略2下的传动轴扭矩已几乎不再振荡。由于调频功率能够很好地体现系统频率的扰动程度, 根据最大调频功率和系统频率最低点对应调频功率的比值减少比例系数和积分系数, 尽管会降低传动轴系的阻尼比, 但仍然能够确保转矩补偿控制对传动轴扭振的抑制作用。总体而言, 策略2在提升风电机组调频性能的同时, 对频率支撑控制附加的机械载荷也具有较好的抑制效果。

4.3 湍流风速下的仿真分析

场景2中的湍流风速曲线如图9所示, 场景2的系统频率、风电机组输出功率以及转子转速曲线如图10所示。由图10可以看出, 由于风速持续变化, 风电机组的输出功率和转子转速出现了明显的波动, 相比场景1, 场景2中风电机组的有功出力降低, 可见湍流风速的随机性会影响风电机组的输出功率, 削弱机组的频率支撑能力。从功率仿真结果来看, 相比传统策略, 策略1和策略2风电机组

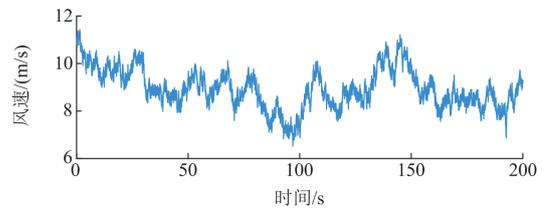


图9 风速曲线

Fig. 9 Wind speed curve

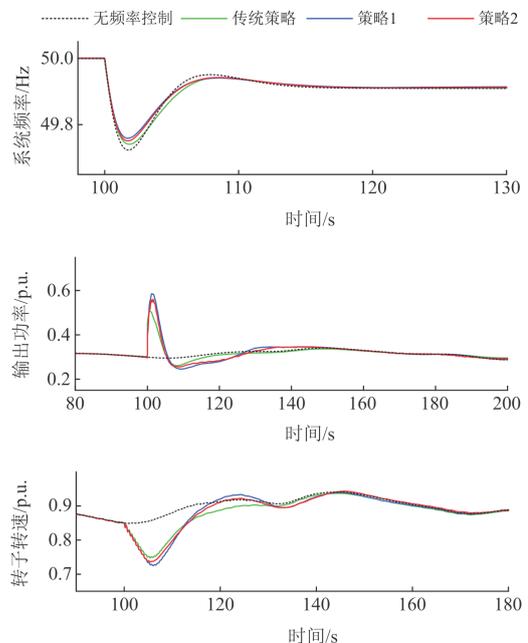


图10 场景2中系统频率、输出功率及转子转速曲线

Fig. 10 System frequency, output power and rotor speed curves in scene 2

的有功功率更高,这是由于在系统频率初始跌落时,策略1和策略2使风电机组能够快速将风力机旋转动能转化为有功功率,因此系统频率最低点得到提高,并且系统频率恢复相对较快。转速仿真结果显示,相比传统策略,策略1和策略2使风电机组转速恢复时间明显减少,系统频率二次跌落的风险降低。综上所述,采用动态调节调频参数方法对湍流风速依然具有较好的调频性能。

场景2的风电机组机械载荷响应曲线如图11所示。可以看出,在湍流风速的作用下传动轴扭矩和塔架侧向弯矩出现了随机振动,策略1和传统策略下风电机组传动轴扭矩和塔架侧向弯矩振幅受到频率支撑控制的影响显著增大,策略2依然能够减小传动轴扭矩和塔架侧向弯矩的振幅,这说明基于转矩补偿的控制策略通过配置合理的比例系数和积分系数后,增强了轴系的等效阻尼和等效刚度,从而减小了传动轴扭矩振幅和塔架侧向弯矩振幅。

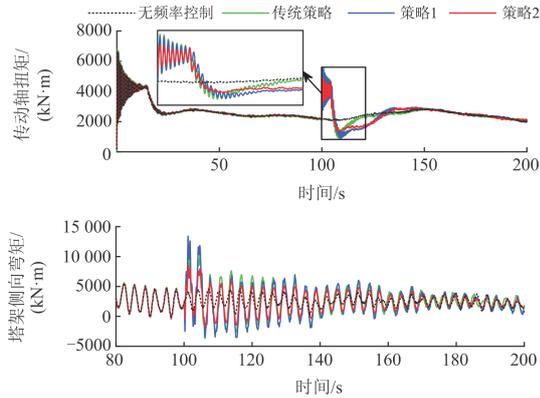


图11 场景2的机械载荷响应曲线

Fig. 11 Mechanical load response curve for scene 2

综上所述,风电机组参与系统调频期间,采用策略2不仅能够合理释放风力机旋转动能,提升风电机组的调频能力,而且对频率支撑引起的传动轴扭振和塔架侧向振动具有较强的抑制作用。

4.4 不同场景下的载荷分析

通常频率支撑对传动轴和塔架带来的冲击载荷远达不到所设计的极限载荷,因此本文以疲劳载荷分析为主。将频率支撑附加的传动轴扭矩和塔架侧向弯矩作为短期载荷谱,利用雨流计数法计算不同策略下的应力水平及对应的循环次数,根据线性累计损伤理论计算这段时间内的损伤等效载荷 L_d ,如式(30)所示。

$$L_d = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^m N_i}{N_d} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (30)$$

式中: σ_i 为第*i*级应力水平, $i=1,2,3,\dots,n$; m 为材料疲劳性能指数; N_i 为第*i*级应力水平对应的循环次数; N_d 为基准载荷循环次数。

不同策略下的损伤等效载荷如图12所示。由图12可以看出,传统策略和策略1对传动轴和塔架的损伤等效载荷较高,频率支撑对传动轴和塔架存在损伤风险。策略2对传动轴和塔架的损伤等效载荷较低。以传统策略下的损伤等效载荷为准,策略2在两个场景下的传动轴损伤分别降低了24.29%和28.82%,塔架损伤分别降低了26.52%和24.56%。

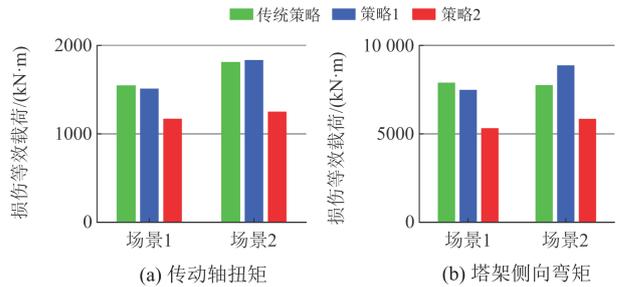


图12 不同场景下的损伤等效载荷

Fig. 12 Equivalent damage load in different scenes

5 结论

本文围绕风电机组参与系统一次调频过程中叶片、塔架和传动轴的载荷抑制策略展开研究,根据风电机组机械结构动力学模型,研究了频率支撑控制对风电机组机械载荷的影响机理,提出了一种调频参数优化和转矩补偿的联合控制策略,提升了风电机组频率支撑能力,同时抑制了频率支撑控制附加的机械载荷,得到以下结论:

1) 在常规综合惯量控制的基础上,建立了频率支撑下风电机组叶片、塔架及传动轴的结构动力学模型,通过分析得出风电机组频率支撑会加剧传动轴系扭振和塔架侧向振动,并且振动强度随着虚拟惯量系数和下垂系数的增大而增大。

2) 在风电机组惯量响应期间动态地调节虚拟惯量系数以及在一次调频期间动态调节下垂系数,能够有效地提高系统频率最低点,并加快转速恢复过程。

3) 转矩补偿控制中的比例系数和积分系数能够增加传动轴系的等效阻尼和等效刚度,进而减小传动轴扭矩和塔架侧向弯矩的振幅和振荡。

参考文献

- [1] NEEVATIKA V, NARENDRA K, SAKET G, et al. Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: classification, challenges, and mitigation techniques[J]. Protection and Control of Modern Power

- Systems, 2023, 8(2): 277-302.
- [2] EL-BAHAY M H, LOTFY M E, EL-HAMEED M A. Effective participation of wind turbines in frequency control of a two-area power system using coot optimization[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 230-244.
- [3] 郭峰, 王悦, 陆鑫, 等. 含高比例风电的新型电力系统的经济运行及储能配置[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 76-82. GUO Feng, WANG Yue, LU Xin, et al. Economic operation and energy storage configuration of new power system with high penetration of wind power[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 76-82.
- [4] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170. LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [5] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44. ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [6] BESHEER A H, LIU X, EISSA S F, et al. Overview on fast primary frequency adjustment technology for wind power future low inertia systems[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 78: 318-338.
- [7] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 157-169. ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 157-169.
- [8] 李成翔, 杜艳丽, 朱益华, 等. 基于风电机组频率主动支撑的多时间尺度调频控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 83-92. LI Chengxiang, DU Yanli, ZHU Yihua, et al. Multi-time scale frequency regulation control strategy based on frequency active support of wind turbines[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 83-92.
- [9] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-24. ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-24.
- [10] 李东东, 张先明, 姚寅, 等. 计及转子动能损失和风速相关性的风电场有效惯量估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 63-73. LI Dongdong, ZHANG Xianming, YAO Yin, et al. Estimation of effective inertia of a wind farm considering rotor kinetic energy loss and wind velocity correlation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 63-73.
- [11] 屈兴武, 王栋, 马天诚, 等. 支撑电网频率稳定的双馈风机一次调频控制需求分析[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 38-46. QU Xingwu, WANG Dong, MA Tiancheng, et al. Requirement analysis of DFIG primary frequency regulation control supporting grid frequency stability[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 38-46.
- [12] 刘军, 朱世祥, 柳盼攀, 等. 考虑系统频率安全稳定约束的风储联合频率响应控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 73-84. LIU Jun, ZHU Shixiang, LIU Panpan, et al. Coordinated control strategy for wind turbine and energy storage equipment considering system frequency safety and stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 73-84.
- [13] 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4335-4352. GAO Bingtuan, HU Zhengyang, WANG Weisheng, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4335-4352.
- [14] 李世春, 王丽君, 薛臻瑶, 等. 基于惯量“削弱-补偿”责任分担的风电场虚拟惯量控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 30-37. LI Shichun, WANG Lijun, XUE Zhenyao, et al. Virtual inertia control method for wind farm based on inertia “weakening-compensation” responsibility sharing[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 30-37.
- [15] LIANG Kai, ZHANG Yangfan, WANG Yaohan, et al. Study on the influence of frequency regulation control on load of wind turbine[C]// 2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), December 23-25, Guangzhou, China: 613-617.
- [16] 杨超, 李东翰, 雷显帅, 等. 虚拟惯量控制对直驱风电机组载荷影响的分析及评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 258-266.

- YANG Chao, LI Donghan, LEI Xianshuai, et al. Analysis and evaluation of impact of virtual inertia control on load of direct-drive wind turbine[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 258-266.
- [17] ZHANG Xiaojie, HE Wei, HU Jiabing. Impact of inertia control of DFIG-based WT on torsional vibration in drivetrain[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2525-2534.
- [18] 孙正龙, 李浩博, 刘铖, 等. 含虚拟惯量的双馈风电机组扭振阻尼特性分析与抑制方法研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4671-4682.
- SUN Zhenglong, LI Haobo, LIU Cheng, et al. Torsional oscillation damping characteristics and suppression methods of doubly-fed induction generator with virtual inertia[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4671-4682.
- [19] 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.
- [20] WANG Yingwei, GUO Yufeng, ZHANG Dongrui. Optimal ancillary control for frequency regulation of wind turbine generator based on improved fatigue load sensitivity[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 137: 107751.
- [21] WANG Haixin, YANG Zihao, CHEN Zhe, et al. Multiple adaptive model predictive controllers for frequency regulation in wind farms[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 38(1): 15-26
- [22] 秦世耀, 代林旺, 王瑞明, 等. 考虑风电机组功率跌落和机械载优化的虚拟惯量控制方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1665-1672.
- QIN Shiyao, DAI Linwang, WANG Ruiming, et al. Virtual inertia control method considering wind turbine power drop and mechanical load optimization[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1665-1672.
- [23] YAO Qi, LI Shaolin, HE Jing, et al. New design of a wind farm frequency control considering output uncertainty and fatigue suppression[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 1436-1446.
- [24] 秦大同, 张福平. 叶片和塔架振动对风电传动系统外载荷的影响[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(5): 1117-1122.
- QIN Datong, ZHANG Fuping. The effects of blades and tower structure vibration to the dynamic loads of wind turbines transmission system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2015, 36(5): 1117-1122.
- [25] 李阳, 李群, 陈载宇, 等. 面向电网最大频率偏差的风电机组短时频率支撑最优策略与机理[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(3): 1020-1034.
- LI Yang, LI Qun, CHEN Zaiyu, et al. Maximum-frequency-deviation-oriented optimal short-term frequency support strategy of wind turbines and the mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 1020-1034.
- [26] 应有, 朱重喜, 杨帆, 等. 大型风电机组塔架主动阻尼控制技术[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 54-60.
- YING You, ZHU Chongxi, YANG Fan, et al. Development of active tower damping control on wind turbines[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2015, 36(1): 54-60.
- [27] 郭海宇, 张英豪, 刘颖明, 等. 基于动力学模型和多种群遗传算法的漂浮式风电机组调谐质量阻尼器参数优化[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(11): 217-223.
- GUO Haiyu, ZHANG Yinghao, LIU Yingming, et al. Optimization design of tuned mass damper for floating wind turbines based on dynamic model and multiple population genetic algorithm[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(11): 217-223.
- [28] 莫若男. 虚拟同步控制下双馈风电机组机电耦合建模及载荷特性分析[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
-
- 收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2024-06-26
- 作者简介:
- 刘军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力发电技术、智能控制理论与应用; E-mail: liujun0310@sina.com
- 全哲辰(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为考虑机组疲劳载荷的风电场调频控制策略。E-mail: quser_driver@qq.com
- (编辑 周金梅)