

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241375

基于系统功率扰动程度的风电机组主动频率支撑控制策略

金泳霖¹, 戈阳阳², 晁璞璞¹, 马欣彤², 曾鹏荃¹, 张睿浩¹, 李卫星¹

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 风电参与系统调频是提升新能源高占比电力系统频率安全稳定水平的关键措施之一。然而风电机组的现有调频控制策略难以适应系统多样化的功率扰动, 未能充分发挥风电机组的快速频率支撑能力。建立了直驱型风电机组调频控制的通用电磁暂态模型, 并对现有调频控制策略下风电机组的动态特性进行了分析, 明确了限制其调频能力的原因。在此基础上, 通过建立计及风电调频的改进系统频率响应模型, 实现了系统功率扰动程度的评估, 并进一步提出了基于该评估结果的风电机组的主动频率支撑控制策略。该策略基于扰动发生后的最大频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)判断系统功率扰动程度, 结合风电机组的运行模式, 选择不同的调频控制组合, 能够在充分发挥风电机组的主动频率支撑能力的同时, 显著降低系统频率的二次跌落风险。仿真结果表明, 相比于定参数调频策略和传统自适应调频策略, 所提方法在不同扰动程度下的调频性能优势明显, 证明了方法的有效性。
关键词: 风电机组; 减载备用控制; 虚拟惯量控制; 下垂控制; 短时增发控制; 转速恢复控制

Wind turbine active frequency support control strategy based on system power disturbance severity

JIN Yonglin¹, GE Yangyang², CHAO Pupu¹, MA Xintong², ZENG Pengquan¹, ZHANG Ruihao¹, LI Weixing¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: Wind power participation in system frequency regulation is a key measure for enhancing the frequency security and stability of power systems with high renewable energy penetration. However, existing wind turbine frequency regulation strategies struggle to cope with diverse power disturbances in such systems and fail to fully utilize wind turbines' fast frequency support capabilities. This paper develops a generalized electromagnetic transient model for frequency regulation control of direct-drive wind turbines and examines their dynamic behaviors under current frequency regulation strategies to identify the factors that limit their regulation capability. Building on this analysis, an improved system frequency response model that incorporates wind power frequency regulation is established to assess the severity of system power disturbances. A novel active frequency support control strategy for wind turbines is then proposed based on this assessment. The strategy evaluates disturbance severity using the maximum rate of change of frequency (RoCoF) following a disturbance and selects different combinations of frequency control methods according to the wind turbine's operational mode. This allows wind turbines to effectively provide active frequency support while significantly reducing the risk of second frequency dips. Simulation results demonstrate that compared with fixed-parameter and traditional adaptive frequency control strategies, the proposed strategy offers superior frequency regulation performance under varying levels of disturbance, demonstrating its effectiveness.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2023ZX-18).

Key words: wind turbines; de-loading reserve control; virtual inertia control; droop control; short-time incremental control; rotor speed recovery control

0 引言

随着新能源机组的大规模并网, 传统同步机组

的占比不断降低, 电力系统的调频能力持续减弱^[1]。同时, 新能源机组有功出力的不确定性和波动性显著增加了系统的调频压力, 导致系统频率失稳风险加剧^[2-4]。为提升新能源高占比电力系统的频率支撑能力, 保证用户用电可靠性, 亟需挖掘电网潜在的

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(2023ZX-18)

调频资源参与系统调频^[5-7]。作为未来电力系统的主力电源之一,制定合理有效的风电机组调频控制策略是提升系统频率安全稳定水平的关键。

针对上述问题,现有研究已提出多种风电机组的调频控制方法,主要包括虚拟惯量控制^[8-9]、下垂控制^[10-12]、减载备用控制^[13-14]和短时增发控制^[15]等。其中,虚拟惯量和下垂控制通过模拟同步发电机组的物理惯量和一次调频特性使风电机组能够参与系统调频;减载备用控制则通过调整风电机组的稳态转速或桨距角留取一定的备用功率,提升风电机组的持续调频能力;而短时增发控制则根据系统变化情况,根据预设曲线调整风电机组的有功功率,主动支撑系统频率。然而,上述常规调频控制均采用固定参数,无法发挥基于电力电子装置并网的风电机组控制策略灵活、可塑性强的优点。

为避免风电机组失速脱网,同时缓解频率二次跌落,文献[16]提出了一种自适应步进惯量控制策略,根据风电机组退出调频时的转子转速自适应设置有功功率下降斜率。文献[17]给出了风电机组惯量支撑能力的定量分析方法,并进一步提出了惯量自适应控制策略,提升了风电机组的惯量响应能力。上述方法采用虚拟惯量控制响应系统频率变化率提升了风电机组的频率支撑能力,但缺乏对于频率偏差的响应。文献[18]建立了包含风电调频的系统频率响应模型,基于不同阻尼比下风电机组调频系数对系统频率的影响,提出了针对下垂参数的自适应控制策略。然而,该方法建立的系统频率响应模型简化程度较深,忽略了风电机组机械部分对调频控制器的影响。文献[19]提出了一种基于效率下垂控制的风电机组调频控制方法,提升了风速变化情况下机组调频的稳定性,但对于机组调频性能的提升有限。文献[20-21]分别在风电并网系统中引入超级电容器和电化学储能装置,提升了风电机组调频能力,但实际工程中储能装置的引入需进一步考虑经济成本。综上,此类研究主要通过调用风电机组的转子动能和外部储能短暂响应系统频率变化,虽能一定程度减小扰动后系统的频率变化率,但对于频率最低点的改善程度较弱。

为使风电机组能够持续参与调频,文献[22]推导了风电机组转子超速时的最大调节功率表达式,计算了风电机组可实现的下垂系数可行域,然而该方法仅考虑了中低风速的工作场景且未给出具体改进调频方案。文献[23]在此基础上提出了适应于不同风速的减载控制策略,制定了变风速下的变下垂系数控制方法,使风电机组能够更充分地参与系统频率调节。文献[24]提出了一种基于限定超速减

载分区的风电调频控制策略,充分利用了超速减载在响应速度上的优势。此外,考虑机组间的风速差异,进一步提出了风电场的协同减载控制方法,提升了风电场整体的调频能力^[25]。但上述方法仍缺乏对于不同的频率扰动工况的考量。文献[26]提出了可变减载方案,利用粒子群优化算法得到最佳的下垂控制参数,配合虚拟惯量控制有效提升了系统的频率稳定性。类似地,文献[27]为兼顾风储联合系统的调频效果与调频经济性,提出了基于粒子群算法的调频死区参数优化方法。然而,上述基于智能优化算法的控制策略运算较为复杂、寻优时间较长,难以应用于实际工程。可见,上述基于减载模式的调频控制策略通过优化控制参数提升了系统的整体频率特性,但仍存在对于不同扰动的适应性不足、机组调频能力调用不充分、工程实用性较弱的问题。

本文首先通过建立直驱型风电机组的通用调频控制模型,分析了调频控制的基本原理和现有策略下风电机组的动态特性和不足。然后,针对不同扰动下调频控制策略适应能力不足的问题,建立了计及风电调频的系统频率响应模型,在验证模型有效性的基础上,提出了系统功率扰动程度的评估方法。接着,根据扰动程度评估结果和风电机组运行状态,设计了不同的调频控制组合,提出了风电机组的主动频率支撑控制策略。最后,基于 MATLAB/Simulink 平台,建立了包含风电、火电和负荷的测试系统,验证了所提策略的有效性。

1 风电机组的调频控制原理及其特性分析

本文建立的直驱型风电机组通用调频控制模型如图 1 所示。图中: v_w 为风速; η_{del} 为减载备用系数; P_{del} 为减载运行模式下的有功功率指令值; P_{ref} 为计及调频功率的有功功率参考值; ΔP_r 为调频功率指令值; ΔP_i 为虚拟惯量控制指令值; ΔP_d 为下垂控制指令值; ΔP_{si} 为短时增发控制指令值; P_{ref}^* 为计及转速恢复的有功功率参考值; ω_{del} 为减载运行模式下的稳态运行转速; ω_r 为实际转速; ω_{rec} 为转速恢复阈值; ω_{r_ref} 为转速参考值; β_{ref} 为桨距角参考值。

由图 1 可知,本文建立的模型计及了风电机组的主流调频控制方法,具备较强的通用性和可扩展性,具体包含:虚拟惯量控制、下垂控制、短时增发控制、超速减载控制、桨距角减载控制和转速恢复控制。按照稳态运行模式,风电机组的调频控制策略主要可分为基于最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式的控制策略和基于减载模式的控制策略。

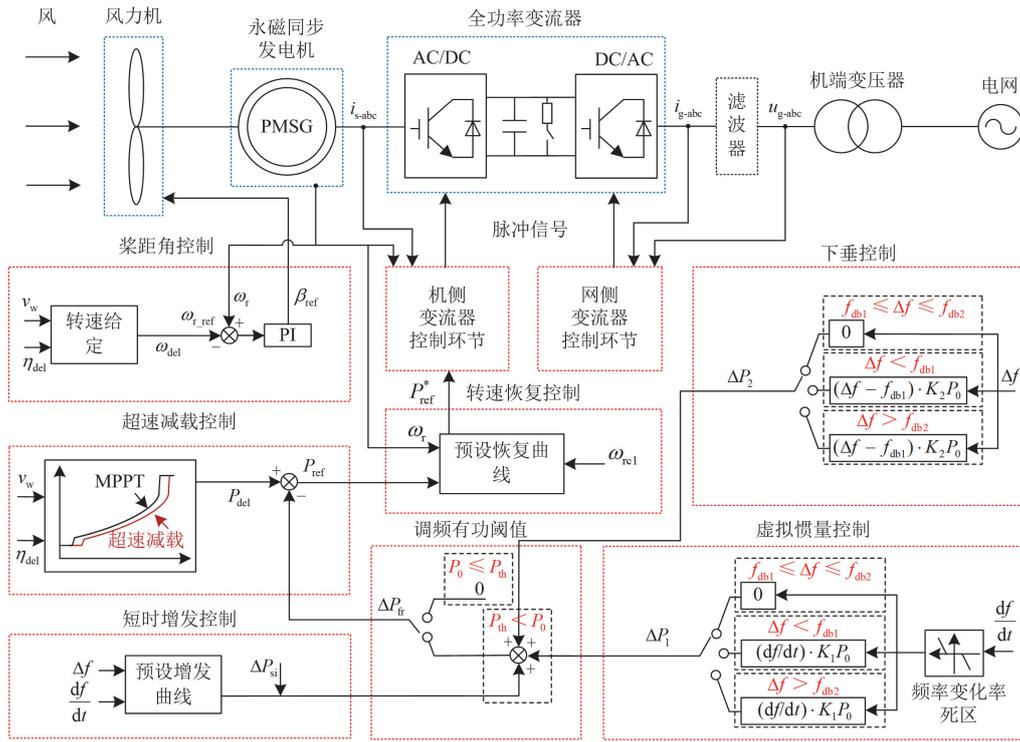


图 1 直驱型风电机组的通用调频控制模型

Fig. 1 General frequency regulation control model for direct-drive wind turbines

在 MPPT 模式下, 风电机组主要通过调用转子动能, 基于虚拟惯量控制、下垂控制和短时增发控制的协同配合, 实现对电网频率的支撑。其中, 虚拟惯量控制和下垂控制分别响应电网的频率变化率和频率偏差, 具体可表示为

$$\Delta P_1 = \begin{cases} 0, f_{db1} \leq \Delta f \leq f_{db2} \text{ or } r_{db1} \leq \frac{df}{dt} \leq r_{db2} \text{ or } \Delta f \cdot \frac{df}{dt} \leq 0 \\ -K_1 \frac{df}{dt} P_0, \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{db1} 与 f_{db2} 、 r_{db1} 与 r_{db2} 分别为频率下降和上升时的调频死区和频率变化率死区; f 为系统频率; Δf 为系统频率偏差; t 为时间; K_1 为风电机组虚拟惯量系数; P_0 为稳态运行时风电机组的有功功率。

$$\Delta P_2 = \begin{cases} 0, f_{db1} \leq \Delta f \leq f_{db2} \\ -K_2 (\Delta f - f_{db1}) P_0, \Delta f < f_{db1} \\ -K_2 (\Delta f - f_{db2}) P_0, \Delta f > f_{db2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_2 为风电机组下垂系数。

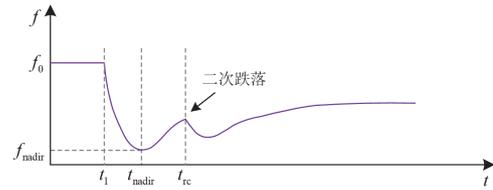
短时增发控制可基于频率变化率或频率偏差, 根据预设曲线输出调频功率, 具备较强的主动性和灵活性, 但需要根据实际扰动合理设计增发策略, 避免有功输出的过度调节或控制的频繁动作。

此外, 为防止运行于低风速区间内的风电机组在调频过程中因转速过低而失稳, 需引入有功阈值限制上述调频控制的动作。

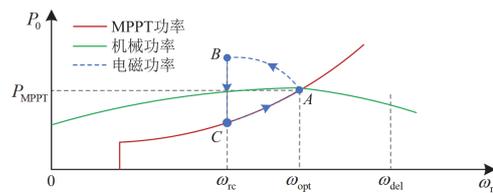
$$\Delta P_{fr} = \begin{cases} 0, P_0 \leq P_{th} \\ \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{si}, P_0 > P_{th} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{th} 为风电机组参与调频的稳态有功阈值。

以频率下降工况为例, 在上述控制策略下, 风电机组的动态响应特性如图 2 所示。



(a) 系统频率特性



(b) 风电机组的动态特性

图 2 MPPT 模式下的动态响应特性

Fig. 2 Dynamic response characteristics under MPPT mode

在稳态运行阶段，风电机组处于运行点 A ，对应有功功率和转速分别为 P_{MPPT} 和 ω_{opt} ，系统频率为 f_0 。 t_1 时刻发生功率扰动，系统频率超出风电机组的调频死区后，风电机组开始参与调频，运行点逐渐移动至 B 点。此阶段内，风电机组的有功功率增加，转速持续下降至转速下限 ω_{rc} 后触发转速保护控制，风电机组的调频控制强制退出，运行点跳变至 C 点，有功功率近似阶跃式跌落。随后，风电机组的转速和有功功率逐渐恢复至稳态运行点 A 。由此可见，常规基于转子动能的风电机组调频控制策略可能引发显著的系统频率二次跌落问题，需配置有效的转速恢复控制缓解频率二次跌落，或在稳态运行阶段采用减载运行模式留取备用功率，从而持续参与系统调频。

风电机组主要通过超速减载控制和桨距角减载控制实现减载，分别通过增大转子转速和桨距角，使得风电机组偏离最优运行点，达到减载运行的效果。超速减载模式下风电机组可同时调用转子动能与备用功率参与调频，响应速度较快，但受转速上下限制，不适用于高风速场景。桨距角控制虽然可以适应更大范围的风速场景，但响应速度较慢，且会增加机械系统的磨损。因此，低风速场景下风电机组优先采用超速减载控制，转速受限的高风速场景则采用桨距角减载控制实现减载运行。同样以频率下降工况为例，减载模式下风电机组的动态响应特性如图 3 所示。

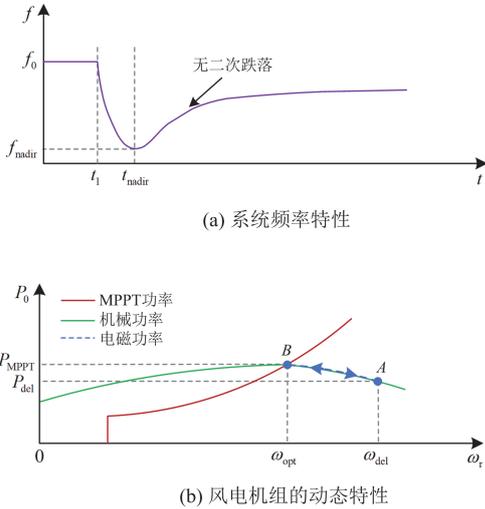


图 3 减载运行模式下的动态响应特性

Fig. 3 Dynamic response characteristics under de-loading mode

在稳态运行阶段，风电机组处于运行点 A ，对应有功功率和转速分别为 P_{del} 和 ω_{del} 。 t_1 时刻发生功率扰动，系统频率超出风电机组的调频死区后，风电机组能够调用转子动能和备用功率持续参与调

频。减载模式下风电机组的有功上限一般设置为 P_{MPPT} ，因此调频过程中风电机组的运行点仅可在 A 点和 B 点之间移动，转速始终不低于 ω_{opt} 。然而，上述控制策略虽然避免了系统频率二次跌落的问题，但也限制了转子动能的充分调用。在新能源渗透率不断上升、系统功率扰动多样化的背景下，亟需提出一种基于系统功率扰动程度灵活调节控制方法，充分发挥风电机组快速频率支撑能力的主动频率支撑控制策略。

2 系统功率扰动程度的评估方法

在新型电力系统背景下，系统中的潜在功率扰动呈现多样化趋势，若风电机组采用传统定参数调频控制策略，可能导致部分扰动工况下出现过度调频或调频能力发挥不充分的问题。针对该问题，本文以扰动发生后系统的最大频率偏差 Δf_{nadir} 为指标，将扰动程度分为轻度、中度和重度 3 个级别。根据 GB/T 15945^[28]，在正常运行状态下，大电网的最大频率偏差应不超过 ± 0.2 Hz。因此本文将扰动后 $|\Delta f_{nadir}| \leq 0.1$ Hz 的情况视为轻度扰动；将 $0.1 < |\Delta f_{nadir}| \leq 0.2$ Hz 的情况视为中度扰动；将 $|\Delta f_{nadir}| > 0.2$ Hz 的情况视为重度扰动。

然而，最大频率偏差点的出现时刻相对扰动发生时刻存在明显的滞后性，同时电力系统作为高阶非线性系统，通过简化解析得到不同功率扰动对应的频率最大偏差难度较大、精度较低，难以直接作为风机调频的控制量。

系统受扰后初始时刻对应的系统 RoCoF 最大，且 RoCoF 的最大值 r_{fmax} 与功率扰动量 ΔP_L 存在线性关系，可间接反映功率扰动程度。因此，本文利用图 4 所示的计及风电调频的改进系统频率响应模型计算 $|\Delta f_{nadir}|$ 达到分割点 0.1 Hz 和 0.2 Hz 时对应的 r_{fmax1} 和 r_{fmax2} 作为评估阈值，实现对于系统功率扰动程度的评估。

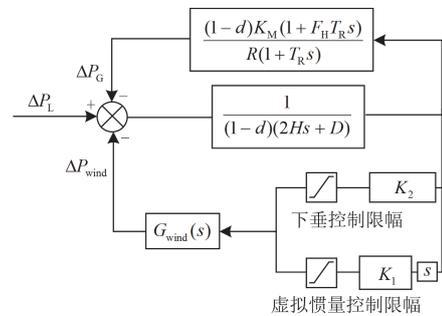


图 4 计及风电调频的改进系统频率响应模型

Fig. 4 Improved system frequency response model including the wind turbine frequency regulation

图 4 中: ΔP_G 为火电机组调频功率; ΔP_{wind} 为风电机组调频功率; R 为火电机组调差系数; T_R 为蒸汽缸再热时间系数; K_M 为机械增益系数; F_H 为高压蒸汽缸做功比例系数; d 为系统新能源占比; H 为火电机组惯量时间常数; D 为火电机组阻尼常数。考虑到不同风速下风电机组采用的减载控制不同, 对应机械部分的表达式不同, 且调频功率存在限幅, 因此引入了风电机组的机械部分 $G_{\text{wind}}(s)$ 和调频功率的限幅环节以提升模型精度。

低风速下风电机组的机械部分表达式为

$$G_{\text{LW}}(s) = \frac{2H_{\text{WTG}}\omega_0 s - (k_{\text{del}}\omega_0^2 + a_1\omega_0)}{2H_{\text{WTG}}\omega_0 s - \omega_0(a_1 - 2k_{\text{del}}\omega_0)} \quad (4)$$

式中: H_{WTG} 为永磁同步电机惯量时间常数; k_{del} 为风电机组减载系数; ω_0 为稳态状态下风电机组转速; a_1 为中间系数。

在高风速下风电机组的机械部分表达式为

$$G_{\text{HW}}(s) = \frac{\left[\frac{2H_{\text{WTG}}T_s^3 + (a_{11c}T_s - a_{11m}T_s + 2H_{\text{WTG}} - (b_1/b_2)T_s)s^2 + (a_{11c} - a_{11m} - 2a_{13}K_p - (b_1/b_2))s - 2a_{13}K_i}{2H_{\text{WTG}}T_s^3 + (a_{11c}T_s - a_{11m}T_s + 2H_{\text{WTG}})s^2 + (a_{11c} - a_{11m} - a_{13}K_p)s - a_{13}K_i} \right]}{\left[\frac{2H_{\text{WTG}}T_s^3 + (a_{11c}T_s - a_{11m}T_s + 2H_{\text{WTG}})s^2 + (a_{11c} - a_{11m} - a_{13}K_p)s - a_{13}K_i}{2H_{\text{WTG}}T_s^3 + (a_{11c}T_s - a_{11m}T_s + 2H_{\text{WTG}})s^2 + (a_{11c} - a_{11m} - a_{13}K_p)s - a_{13}K_i} \right]} \quad (5)$$

式中: K_p 、 K_i 为桨距角控制器 PI 系数; T_s 为桨距角控制器时间常数; a_{11c} 、 a_{11m} 、 a_{13} 、 b_1 、 b_2 为推导中所得中间系数^[29]。

为验证上述计及风电调频的系统频率响应模型的精确性, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建包含火电厂、风电场、负荷的测试系统。图 5 表示不同风速场景和负荷扰动下, 详细电磁暂态模型、传统频率响应模型和本文所提模型的频率响应曲线。本文模型和详细电磁暂态模型在扰动发生至达到频率最低点期间的频率响应几乎一致, 小风和大风场景下 r_{fmax} 和 Δf_{nadir} 的偏差均小于 0.02%, 精度远高于传统频率响应模型, 证明了本文模型的有效性。至此, 实现了对于系统功率扰动程度的评估, 为后续风电机组控制策略的设计提供基础。

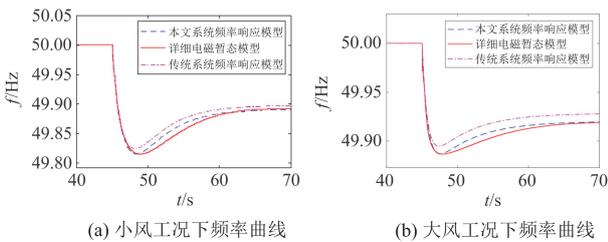


图 5 不同模型的频率曲线对比

Fig. 5 Comparison of frequency curves of different models

3 基于系统功率扰动程度的风电机组主动频率支撑控制策略

考虑到不同风速场景下风电机组的调频能力不同, 不同扰动下系统的调频需求亦不同。本节基于第 2 节提出的系统功率扰动程度的评估方法, 提出多组调频控制组合, 实现能够适应不同风速和扰动的风电机组主动频率支撑控制策略。

3.1 轻度、中度扰动工况下的自适应频率支撑控制策略

轻度、中度扰动工况下 $|\Delta f_{\text{nadir}}| \leq 0.2$ Hz, 系统的总体调频能力可以满足调频需求, 风电机组需在发挥其调频能力的同时, 避免过度调频导致的频率振荡或失稳。因此, 在轻度、中度扰动工况下, 风电机组在减载模式的基础上采用虚拟惯量和下垂控制参与系统调频。不同的是, 如式(6)和式(7)所示, 轻度扰动下虚拟惯量和下垂系数根据 r_{fmax} 进行自适应变化, 中度扰动则直接采用最大系数以增强调频效果。

$$\begin{cases} K_1 = T_J f_N \\ T_J = K_J r_{\text{fmax}} + T_{J\text{min}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} K_2 = K_f / f_N \\ K_f = K_{\text{kf}} r_{\text{fmax}} + K_{\text{fmin}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_N 为系统额定频率; T_J 和 K_f 分别为等效惯性时间常数和有功调频系数; $T_{J\text{min}}$ 、 K_{fmin} 分别为 T_J 、 K_f 的最小值, 根据 GB/T 19963.1—2021 取值^[30]。 K_J 和 K_{kf} 分别为 T_J 和 K_f 的自适应调节系数, 以频率跌落工况为例, 表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} K_J = (T_{J\text{max}} - T_{J\text{min}}) / r_{f1} \\ K_{\text{kf}} = (K_{\text{fmax}} - K_{\text{fmin}}) / r_{f1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{J\text{max}}$ 、 K_{fmax} 分别为 T_J 和 K_f 的最大值, 同样由文献[30]得到; r_{f1} 为 Δf_{nadir} 等于 -0.1 Hz 对应扰动工况的最大频率变化率。

此工况下, 风电机组最大调频功率 ΔP_{fmax} 如式(9)所示, 始终不超过减载备用功率, 避免了二次跌落。

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{fmax}} = -\text{Sgn}(\Delta f) \Delta P_{\text{del}} \\ \Delta P_{\text{del}} = P_0 \eta_{\text{del}} / (1 - \eta_{\text{del}}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔP_{del} 为风电机组的备用功率。

3.2 重度扰动工况下的自适应频率支撑控制策略

重度扰动工况下系统的总体调频能力无法满足调频需求, 风电机组需尽可能发挥其快速调频能力, 抑制系统频率的快速跌落。

在小风场景下, 风电机组运行于超速减载模式, 频率跌落工况采用式(10)所示的基于风机最优转速的短时增发控制, 可快速调用备用功率和转子动能

支撑系统频率，同时避免转速的快速降低。

$$\Delta P_{si} = K_{si} \omega_{opt} + \Delta P_{del} \quad (10)$$

式中： K_{si} 为短时增发功率系数； ω_{opt} 为当前风速对应的最优转速。

由式(10)可知，此时风电机组的调频功率已超出备用功率，转子转速将持续降低。为避免风机失速并缓解系统频率的二次跌落，采用式(11)所示的转速恢复控制。

$$\Delta P_{rc} = \begin{cases} \Delta P_{si} - K_{rc}(t - t_{rc1}), & t_{rc1} < t \leq t_{rc2} \\ \Delta P_{rc2} + \frac{\Delta P_{del} - \Delta P_{rc2}}{\omega_{opt} - \omega_{rc2}}(\omega_r - \omega_{rc2}), & t_{rc2} < t \leq t_{rc3} \end{cases} \quad (11)$$

式中： K_{rc} 为转速恢复系数； t_{rc1} 为转速恢复开始时刻，即转速降低至恢复阈值 ω_{rc1} 的时刻，本文取 $\omega_{rc1} = 0.8\omega_n$ ， ω_n 为风电机组的额定转速； t_{rc2} 为进入转速恢复阶段后转速重新恢复至 $0.8\omega_n$ 的时刻； ω_{rc2} 和 ΔP_{rc2} 分别为 t_{rc2} 时刻的转速和有功功率； t_{rc3} 为转速恢复结束时刻，即转速恢复至 ω_{opt} 的时刻。

转速恢复结束后，机组仍保持备用功率的完全释放，调频功率维持在 ΔP_{del} ，直至系统频率偏差小于 0.1 Hz 后切换至下垂控制，其中下垂系数采用最大值。上述调频过程的机组动态过程如图6所示。

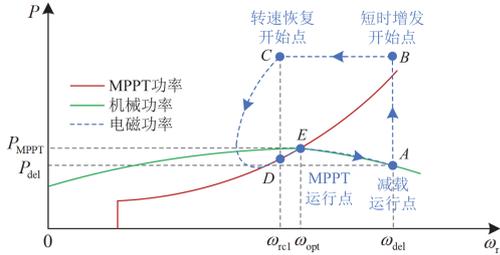


图6 小风场景、重度扰动工况下的动态响应特性
Fig. 6 Dynamic response characteristics under low wind scenario and severe disturbance condition

如图6所示，稳态状态下风电机组处于减载运行点A；检测到重度扰动发生后，进入短时增发状态，运行点跳变至B点并进一步向C点移动，此状态下风电机组的转速持续降低；转速降低至 ω_{rc1} 后，风电机组进入转速恢复阶段，有功功率按照式(11)先降后升，运行点由C点经D点移动至E点，随后机组处于MPPT运行状态，调频功率维持在 ΔP_{del} ；系统频率偏差小于 0.1 Hz 后，风机进入下垂控制状态，运行点在E点和A点之间移动；最后，系统频率恢复，风电机组的运行点重新恢复至A点。

对于重度扰动工况下的其余频率扰动和风速场

景，综合考虑风电机组的转速上下限、功率上限，采用常规增发策略，即增发功率等于减载功率，以兼顾风机调频能力的发挥和控制策略的工程实用性。至此，形成了基于系统功率扰动程度的风电机组主动频率支撑控制策略，具体示意图如图7所示。

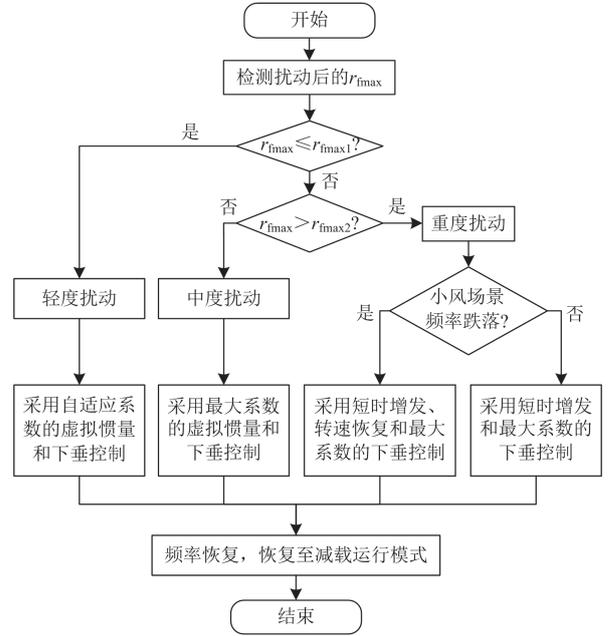


图7 所提控制策略的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the proposed control strategy

4 仿真验证

为验证本文所提控制策略的有效性，基于MATLAB/Simulink仿真平台，搭建了如图8所示的由火电厂、风电场和负荷组成的调频响应测试系统。其中，火电容量为 100 MW ，风场容量为 49.5 MW 。

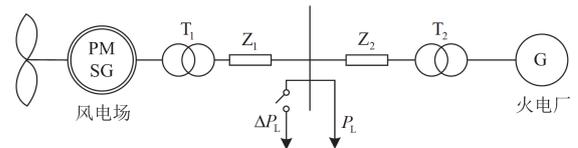


图8 仿真系统结构图

Fig. 8 Simulation system structure

4.1 轻度扰动

设置 $t = 45\text{ s}$ 时系统负荷突增 4% ，采用本文控制、定参数控制和传统自适应控制的仿真结果如图9所示。

由图9可知，系统功率轻度扰动工况下，相比传统自适应控制和定参数控制，采用本文控制时系统频率最低点分别提升了 0.005 Hz 和 0.017 Hz ，调频性能有所提升。同时，风电机组在调频过程中的有功功率变化平滑，有利于风机的稳定运行。

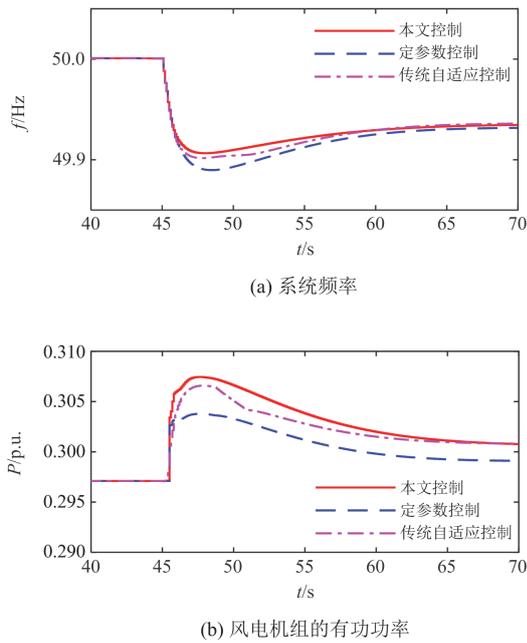


图9 轻度扰动下仿真结果

Fig. 9 Simulation results under slight disturbance

4.2 中度扰动

设置风电场中 $t = 45\text{ s}$ 时系统负荷突增 8.8%，采用上述 3 种控制策略时的仿真结果如图 10 所示。

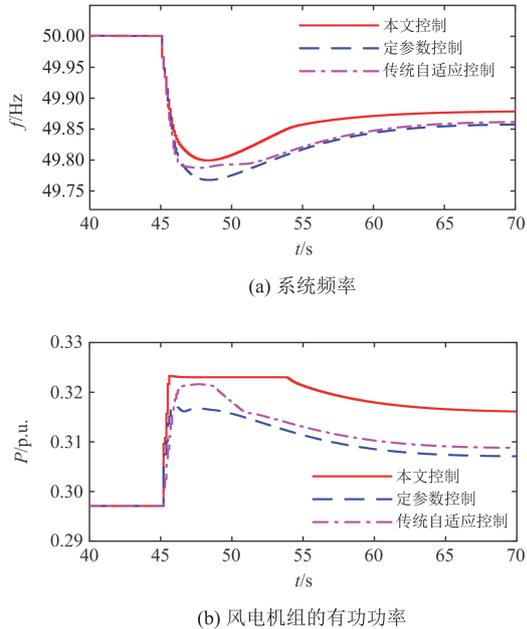


图10 中度扰动下仿真结果

Fig. 10 Simulation results under medium disturbance

系统功率中度扰动下，风电机组的调频功率明显提升，采用本文控制时调频功率已达到限幅。同时，相比其他两种控制，采用本文控制时系统频率

最低点分别提升了 0.01 Hz 和 0.03 Hz，暂稳态频率提升了约 0.017 Hz，证明了本文提出策略的优越性。

4.3 重度扰动

4.3.1 低风速场景

在低风速下，设置 $t = 45\text{ s}$ 时系统负荷突增 10%，采用上述 3 种控制策略时的仿真结果如图 11 所示。

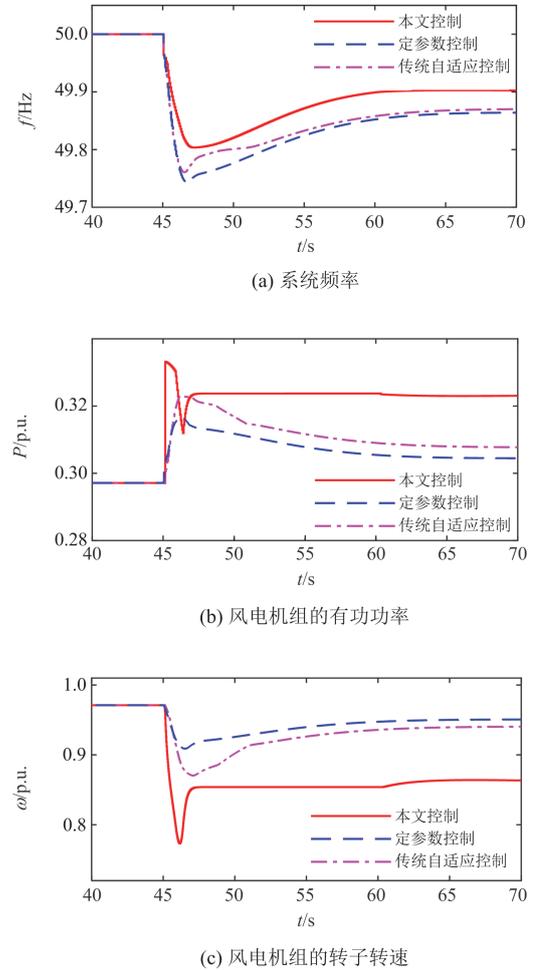


图11 低风速、重度扰动下仿真结果

Fig. 11 Simulation results of low wind and severe disturbance

由仿真结果可知，风电机组按照提出的控制策略，先后经历了基于风机最优转速的短时增发、转速恢复、常规增发和下垂控制 4 个阶段。其有功功率和转速的变化趋势与 3.2 节中的分析一致，证明了方法的正确性。从系统频率来看，相比其他两种控制，采用本文控制策略时系统频率最低点分别提升了 0.043 Hz 和 0.06 Hz，暂稳态频率提升了约 0.039 Hz。此外，本文方法在显著降低扰动后系统频率变化率的同时，并未引起明显的系统频率二次跌落，证明了方法的优越性。

4.3.2 高风速场景

在高风速下, 设置 $t = 45$ s 时系统负荷突增 10%, 采用上述 3 种控制策略时的仿真结果如图 12 所示。

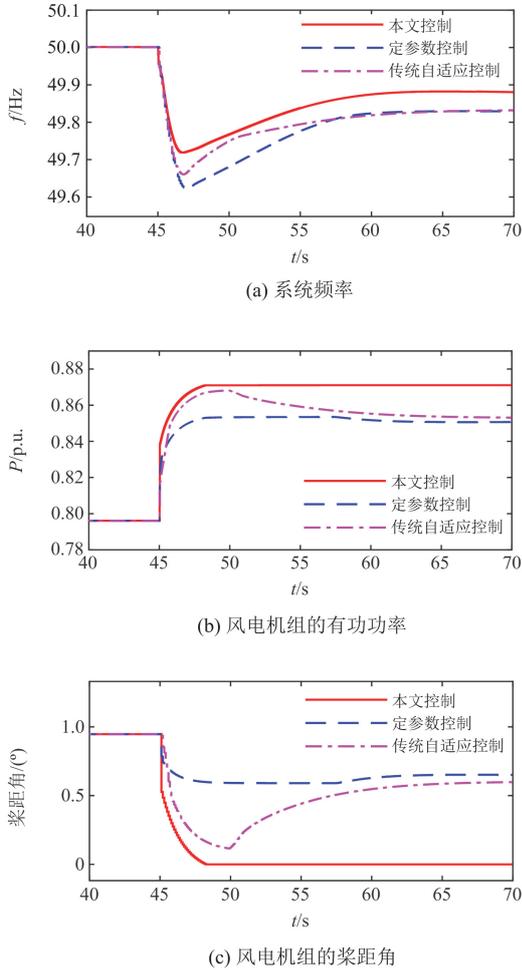


图 12 高风速、重度扰动下仿真结果

Fig. 12 Simulation results of high wind and severe disturbance

由仿真结果可知, 在高风速场景下, 风电机组的调频能力较强, 但受限于桨距角机械动作, 调节速度慢于低风速场景。在 3.2 节提出的常规增发控制下, 采用本文控制时, 风电机组的桨距角减小至 0° , 完全释放了备用功率。因此, 相比其他两种控制策略, 采用本文控制策略时系统频率最低点分别提升了 0.058 Hz 和 0.1 Hz, 暂稳态频率提升了约 0.05 Hz, 调频效果显著提升。

综上, 在不同风速场景和不同功率扰动程度下, 本文所提控制策略均可显著提升风电机组的调频性能并维持机组的稳定运行, 证明了所提策略的优越性。尤其在小风场景、重度扰动工况下, 实现了风电机组备用功率和转子动能的快速调用, 在显著降低扰动后系统频率变化率的同时, 缓解了转速恢复

过程引起的系统频率的二次跌落, 充分发挥了风电机组的快速调频能力。

5 结论

本文在建立和分析直驱型风电机组通用调频控制模型的基础上, 提出了基于系统功率扰动程度的风电机组主动频率支撑控制策略。通过建立计及风电调频的改进系统频率响应模型, 利用扰动后系统最大频率变化率与频率最低点的关系设计了评估依据, 实现了对于系统功率扰动程度的评估。综合虚拟惯量、下垂、短时增发、转速恢复和减载备用控制, 在不同风速场景和扰动程度下采用不同调频控制组合的策略, 实现了风电机组备用功率和转子动能的快速调用, 在多种场景和工况下显著提升了风电机组的主动频率支撑性能。该策略可为新能源高占比电力系统的安全稳定运行提供技术支撑。

参考文献

- [1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 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.
- [3] SINGARAO V Y, RAO V S. Frequency responsive services by wind generation resources in United States[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 1097-1108.
- [4] 姜涛, 邱宇琛, 刘先超, 等. 多风电场支撑电网频率稳定的动态差异化时序协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 162-173.
- [5] 鲁宗相, 李佳明, 乔颖, 等. 新能源场站快速频率支撑能力评估研究现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.

ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

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.

JIANG Tao, QIU Yuchen, LIU Xianchao, et al. Control strategy with dynamic and differentiated timing synergy for multiple wind farms supporting frequency stability of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 162-173.

LU Zongxiang, LI Jiaming, QIAO Ying, et al. Research status and technical prospects of fast frequency support capability evaluation of new energy stations[J]. Power System Automation, 2021, 45(9): 171-191.

- 2024, 48(10): 1-19.
- LU Zongxiang, LI Jiaming, QIAO Ying, et al. Research status and technology prospects of fast frequency support capability assessment for renewable energy stations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(10): 1-19.
- [6] 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.
- [7] 田刚领, 武鸿鑫, 李娟, 等. 风电场多功能储能电站功率分配策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(9): 247-256.
- TIAN Gangling, WU Hongxin, LI Juan, et al. Power distribution strategy of multi-functional energy storage power station in wind farm[J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 247-256.
- [8] 李世春, 宋秋爽, 薛臻瑶, 等. 含风电虚拟惯性响应的新能源电力系统惯量估计[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(2): 84-93.
- LI Shichun, SONG Qiushuang, XUE Zhenyao, et al. Inertia estimation of new energy power system with virtual inertia response of wind power[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2): 84-93.
- [9] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(15): 64-70.
- LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 64-70.
- [10] KIM Y, KANG M, MULJADI E, et al. Power smoothing of a variable-speed wind turbine generator in association with the rotor-speed-dependent gain[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 990-999.
- [11] 高海淑, 张峰, 丁磊. 风电机组两分段下垂调频控制策略及参数整定方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(18): 111-121.
- GAO Haishu, ZHANG Feng, DING Lei. Two-segment droop frequency regulation control strategy and parameter setting method for wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(18): 111-121.
- [12] 刘辉, 罗薇, 苏懿, 等. 计及 ROCOF 与转子动能的风电机组自适应下垂控制策略[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 161-169.
- LIU Hui, LUO Wei, SU Yi, et al. Adaptive droop control strategy for wind turbines based on ROCOF and rotor kinetic energy[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 161-169.
- [13] LI S, WANG M. A novel model of the lower active power limit (LAPL) of DFIG under overspeed mode[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125.
- [14] 梅铭洋, 寇鹏, 张智豪, 等. 考虑平台运动的浮式海上风机频率响应控制[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-13[2024-10-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232721>.
- MEI Mingyang, KOU Peng, ZHANG Zhihao, et al. Control of floating offshore wind turbines for system frequency response considering platform motions[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-13[2024-10-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232721>.
- [15] KANG M, MULJADI E, HUR K, et al. Stable adaptive inertial control of a doubly-fed induction generator[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6): 2971-2979.
- [16] 张鹏, 杨苹, 唐玉烽, 等. 风电机组自适应步进惯量控制策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3401-3408.
- ZHANG Peng, YANG Ping, TANG Yufeng, et al. Adaptive stepwise inertial control strategy for wind turbines[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(8): 3401-3408.
- [17] 胡正阳, 高丙团, 张磊, 等. 风电机组双向支撑能力分析 与自适应惯量控制策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(19): 5224-5240.
- HU Zhengyang, GAO Bingtuan, ZHANG Lei, et al. Bidirectional support capability analysis and adaptive inertial control strategy of wind turbine[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(19): 5224-5240.
- [18] 钱敏慧, 张建胜, 秦文萍, 等. 计及 DFIG 调频的系统频率响应特性分析及快速频率支撑策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 58-67.
- QIAN Minhui, ZHANG Jiansheng, QIN Wenping, et al. System frequency response characteristic considering DFIG frequency regulation and fast frequency response strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(3): 58-67.
- [19] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Dynamic droop control for wind turbines participating in primary frequency regulation in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 5742-5751.
- [20] 颜湘武, 孙雪薇, 崔森, 等. 基于转子动能与超级电容器储能的双馈风电机组惯量和一次调频改进控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(增刊 1): 179-190.
- YAN Xiangwu, SUN Xuewei, CUI Sen, et al. Improved control strategy for inertia and primary frequency regulation of doubly fed induction generator based on rotor kinetic

- energy and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 179-190.
- [21] WOONG J S, GREGOR V, NING Z, et al. Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6193-6205.
- [22] 穆钢, 蔡婷婷, 严干贵, 等. 双馈风电机组参与持续调频的双向功率约束及其影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1750-1759.
- MU Gang, CAI Tingting, YAN Gangui, et al. Bidirectional power constraints and influence of doubly fed induction generator participating in continuous frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1750-1759.
- [23] 李颖颖, 王德林, 范林源, 等. 双馈风电机组限功率运行下频率稳定的变系数控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2910-2917.
- LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, et al. Variable coefficient control strategy for frequency stability of DFIG under power-limited operation[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2910-2917.
- [24] ZHANG X, ZHA X, YUE S, et al. Frequency regulation strategy for wind power based on limited over-speed de-loading curve partitioning[J]. IEEE Access, 2018, 6: 22938-22951.
- [25] ZHANG X, CHEN Y, WANG Y, et al. Deloading power coordinated distribution method for frequency regulation by wind farms considering wind speed differences[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122573-122582.
- [26] 边晓燕, 印良云, 丁炆, 等. 基于 DFIG 虚拟惯量与下垂控制的微电网调频优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 452-460.
- BIAN Xiaoyan, YIN Liangyun, DING Yang, et al. Micro-grid frequency modulation optimization based on DFIG virtual inertia and droop control[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(9): 452-460.
- [27] 李东东, 陈治廷, 徐波, 等. 考虑一次调频死区的风储协同调频机理分析及死区参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 38-47.
- LI Dongdong, CHEN Zhiting, XU Bo, et al. Mechanism analysis and optimal dead zone parameter of wind-storage combined frequency regulation considering primary frequency regulation dead zone[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 38-47.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量—电力系统频率允许偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality—frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [29] KR PAN M, KUZLE I. Introducing low-order system frequency response modelling of a future power system with high penetration of wind power plants with frequency support capabilities[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(13): 1453-1461.
- [30] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Technical specification for connecting wind farm to power system part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2025-02-11

作者简介:

金泳霖(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电、电力系统分析与控制; E-mail: yljn@dlut.edu.cn

戈阳阳(1983—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为清洁能源及微电网并网技术; E-mail: 15942302722@163.com

晁璞璞(1990—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源建模与并网控制。E-mail: pupuc@163.com

(编辑 石晋美)