

计及转速下限和频率安全约束的风电调频参数整定方法

张龙^{1,2}, 孙丹¹, 年珩¹, 毕家瑞¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网江西省电力公司南昌供电分公司, 江西 南昌 330012)

摘要:风电机组一般通过综合惯量控制提供辅助调频, 然而其调频效果受控制参数影响较大。文中综合考虑风电机组自身可调能力与系统频率响应指标, 对风电调频参数整定进行研究。首先, 建立计及风电和火电参与调频的系统频率响应(system frequency response, SFR)模型, 并推导频率响应指标的解析式。其次, 对风电机组的转子运动方程进行线性化并建立转速模型, 在不同风速工况下验证其准确性。然后, 以提升系统频率最低点为目标, 同时考虑风电机组转速下限和系统频率安全约束, 整定其控制参数。最后, 仿真结果验证所提风电调频控制参数整定方法在不同风电渗透率以及功率扰动下, 均能够在确保系统频率安全的前提下充分利用风电机组的转子动能。

关键词:风电机组; 综合惯量控制; 系统频率响应(SFR)模型; 频率安全约束; 转速约束; 参数整定

中图分类号: TM64

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0025-10

0 引言

近年来, 电网中风电渗透率不断提高, 大规模风电机组通过电力电子设备并网。风电机组虽具有天然的旋转惯量, 但变流器的隔离作用使其转子转速与系统频率解耦, 导致其无法支撑电网频率。此外, 风电机组一般工作在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)状态, 不具有备用功率, 且其出力具有随机性和波动性。因此在电力系统风力发电占比持续上升的背景下, 系统的等效惯量逐渐下降, 在大功率扰动下系统的频率安全问题显著^[1-6]。为此, 世界各国的并网导则对风电参与调频提出了新要求^[7-8]。

为使风电机组主动参与系统频率调节, 国内外学者对风电调频控制策略展开一系列研究。其中, 根据风电机组调频能量的来源可分为转子动能控制^[9-15]和功率备用控制^[16-17]。功率备用控制会使风电机组偏移最佳工作点, 不可避免地造成风能的损失, 不利于风电场的整体经济性。转子动能控制的思想为通过附加控制环节使风电机组转速与系统频率耦合, 从而在频率故障后实现转子动能与电磁功率的相互转换, 使风电机组参与系统的频率支撑。根据控制结构的差异, 转子动能控制策略可分为虚拟惯性控制^[9]、下垂控制^[10]、综合惯量控制^[11]以及虚拟同步机控制^[12-13]等。其中, 虚拟同步机控制尚且处于示范阶段, 还未大规模应用。文献^[18]中的风电机组采用固定的下垂控制系数, 对不同风速区间的适应性较差。为解决此问题, 文献

^[19]提出根据风电机组转速整定下垂控制系数, 使高速风电机组释放更多的转子动能以提高调频功率。文献^[20]根据风电机组转子动能和可调功率定义调频能力因子, 并根据该因子整定不同风电机组的综合惯量控制系数。文献^[21]提出一种基于转子有效储能的风电机组自适应虚拟惯量控制策略, 能够根据风电机组的运行状态实时改变其控制参数。文献^[22]推导了风电机组调频过程中转子转速的极小值和稳态值, 由此确定不触发风电机组转速下限的下垂控制系数。但上述文献均是从风电机组自身可调能力的角度进行参数整定, 没有考虑系统频率响应指标的影响, 且缺乏风电机组控制参数对系统频率响应指标影响规律的定量分析。文献^[23]综合考虑系统频率变化率和频率偏差的影响, 利用模糊算法提出一种风电机组虚拟惯量自适应控制方法。文献^[24-25]将风电机组的下垂系数与系统频率偏差相耦合, 能够根据电网频率偏差量灵活调节风电机组下垂系数, 但没有考虑系统风电渗透率和系统冲击负荷大小的影响, 当系统风电渗透率或扰动变化时可能无法实现原有的控制效果。

针对上述问题, 文中综合考虑系统不平衡扰动和风电渗透率的影响, 在保证风电机组转速和系统频率安全的前提下, 以改善系统频率响应特性为目标研究风电机组的调频参数整定方法。首先, 建立风火联合调频的系统频率响应(system frequency response, SFR)模型, 并基于此获得系统频率响应指标的表达式, 定量分析风电机组调频参数对 SFR 性能的影响规律。然后, 综合考虑系统频率与转子转速的交互影响, 基于风电机组的转子运动方程建立

其转速模型,在调频过程中能实现对风电机组转速的准确预测。进一步地,建立以提升系统频率最低点为目标的优化问题求解风电调频参数,以期在保证系统频率安全的同时充分发挥风电机组的调频潜力。最后,通过仿真对比验证所提方法的有效性。

1 基于综合惯量控制的 SFR 建模

1.1 风电机组的综合惯量控制

综合惯量控制是风电机组最常见的一种频率控制方法,其控制框图如图1所示。图中, ω_r 为风电机组的转速; P_{MPPT} 为风电机组的最大功率追踪控制指令; P_{ref} 为风电机组的功率指令; K_d 、 K_p 分别为风电机组的虚拟惯量控制系数和下垂控制系数; Δf 为系统的频率偏差; s 为微分算子。当系统出现功率扰动导致频率变化时,综合惯量控制通过将频率变化率和频率偏差引入风电机组的功率控制中实现转子转速与系统频率的耦合。附加功率指令由两部分组成:一部分为与系统频率变化率成正比的虚拟惯性功率,另一部分为与系统频率偏差成正比的下垂功率。由此可得风电机组的功率指令 P_{ref} 为:

$$P_{ref} = P_{MPPT} - (K_d s + K_p) \Delta f \quad (1)$$

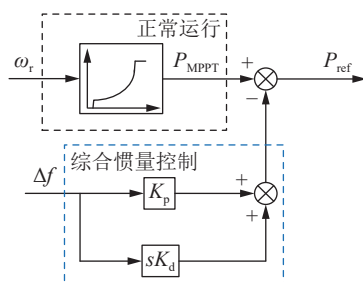


图1 风电机组综合惯量控制框图
Fig.1 Block diagram of wind turbine integrated inertia control

对式(1)进行小信号分析可得风电机组在调频期间的功率变化量 ΔP_{ref} 为:

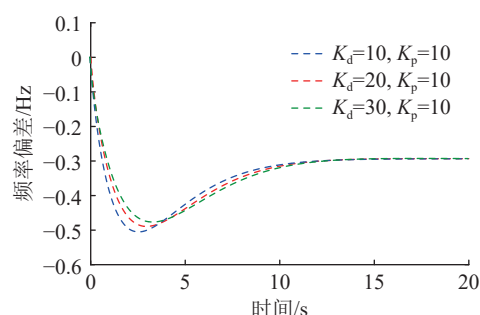
$$\Delta P_{ref} = \Delta P_{MPPT} + \Delta P_w = 3k\omega_{r0}^2 \Delta\omega_r - (K_d s + K_p) \Delta f \quad (2)$$

式中: ΔP_{MPPT} 为最大功率跟踪控制功率变化量; ΔP_w 为综合惯量控制功率变化量; ω_{r0} 为风电机组的初始转速; $\Delta\omega_r$ 为风电机组的转速增量; k 为风电机组的最大功率追踪控制系数。在调频初期,风电机组转速的变化较小, ΔP_{MPPT} 项可忽略不计,风电机组增发功率参与系统频率调节。但随着风电机组释放转子动能参与调频,风电机组转速不断下降,此时不可忽略 ΔP_{MPPT} 项的调频负作用,MPPT控制将会削弱风电机组的惯量支撑效果。为避免上述问题,文中在频率扰动初期将闭锁 MPPT 控制,即将

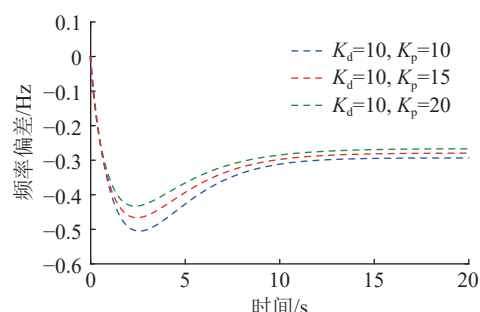
风电机组的功率跟踪控制指令值设定为常数,由此可得风电机组的输出功率变化量为:

$$\Delta P_{ref} = -(K_d s + K_p) \Delta f \quad (3)$$

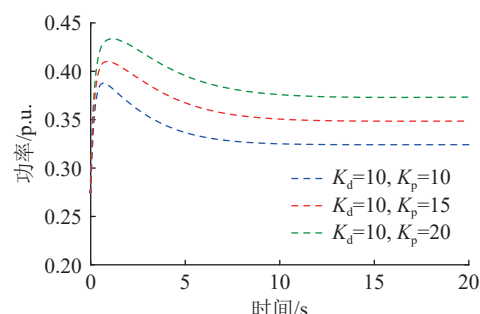
当考虑风电机组参与调频时,其调频效果主要受频率控制参数的影响。为说明不同风电机组控制参数对 SFR 特性的影响,在总装机容量为 3 375 MW、风电渗透率为 20% 的系统中施加 10% 系统容量作为频率事件,图2给出不同控制参数下系统的动态响应波形。



(a) 不同虚拟惯量控制系数下系统频率偏差



(b) 不同下垂控制系数下系统频率偏差



(c) 不同下垂控制系数下风电机组的输出功率

图2 不同控制参数下的动态响应波形

Fig.2 Dynamic response waveforms under different control parameters

风电机组的虚拟惯量控制主要作用于频率故障的初期,由图2(a)可知,风电机组的虚拟惯量控制能够减缓系统频率跌落的速度,并在一定程度上提升系统的频率最低点。但不同虚拟惯量控制系数下系统的稳态频率基本相同,这是因为当系统频率趋于稳定时风电机组虚拟惯量控制项的输出功率为零。而风电机组的下垂控制作用于系统频率

偏差, 只要系统频率存在偏差, 下垂控制就能输出功率以支撑系统频率。在频率故障初期, 由于系统频率偏差较小, 下垂控制项输出的功率较小, 但随着系统频率偏差增大, 下垂控制能够有效输出功率以抑制系统频率下降。由图 2(b)和图 2(c)可知, 风电机组的下垂控制系数越大, 其输出的功率越多, 系统的频率最低点和稳态频率越高。综上可知, 风电机组的控制参数对系统频率响应指标有较大影响, 因此有必要在风电调频控制参数整定时考虑系统频率响应指标的约束。

1.2 SFR 模型

文中在传统 SFR 模型^[26]的基础上添加风电的功率控制环节, 建立包含同步发电机和风电参与系统频率支撑的 SFR 模型, 如图 3 所示。图中, ΔP_L 为系统的功率扰动, 其基准容量为风电和火电的装机容量之和; ρ 为风电渗透率, 其值为风电的装机容量与风电、火电的装机容量总和的比值; H 、 D 分别为火电机组的等值惯性时间常数和阻尼系数; R 为火电机组的等值调差系数; T_R 为火电机组的等值再热时间常数; F_H 为火电机组汽轮机的高压缸做功比例。

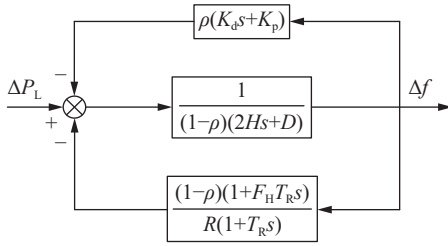


图 3 基于综合惯量控制的 SFR 模型

Fig.3 SFR model based on integrated inertia control

由图 3 可知, 系统的传递函数为:

$$G(s) = \left[(1-\rho)(2Hs+D) + \frac{(1-\rho)(1+F_H T_R s)}{R(1+T_R s)} + \rho(K_d s + K_p) \right]^{-1} \quad (4)$$

当系统中发生大小为 ΔP_L 的阶跃功率扰动时, 系统频率的频域表达式可以写为:

$$\Delta f(s) = -\frac{\Delta P_L}{s} G(s) = \frac{-\Delta P_L R \omega_n^2}{D_e} \times \frac{1+T_R s}{(s^2 + 2\delta \omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} D_e = (1-\rho) + [(1-\rho)D + \rho K_p]R \\ \omega_n^2 = D_e/[2(1-\rho)HRT_R + \rho K_d RT_R] \\ \delta = \{[2(1-\rho)H + \rho K_d]R + [(1-\rho)D + \rho K_p]RT_R + (1-\rho)F_H T_R\} \omega_n / (2D_e) \end{cases} \quad (6)$$

式中: D_e 为系统的等效阻尼; ω_n 为系统的自然振荡

角频率; δ 为系统的阻尼比。

由式(5)可知, 系统的频率响应模型为典型的二阶系统, 对式(5)进行拉普拉斯反变换可得系统频率的时域表达式为:

$$\Delta f(t) = \frac{-R\Delta P_L}{D_e} \left[\frac{c_1(e^{\lambda_1 t} - 1)}{\lambda_1} + \frac{c_2(e^{\lambda_2 t} - 1)}{\lambda_2} \right] \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\delta \omega_n - \omega_n \sqrt{\delta^2 - 1} \\ \lambda_2 = -\delta \omega_n + \omega_n \sqrt{\delta^2 - 1} \\ c_1 = \frac{\omega_n^2(1+T_R \lambda_1)}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ c_2 = \frac{\omega_n^2(1+T_R \lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_1} \end{cases} \quad (8)$$

为验证式(7)的准确性, 在常规火电机组 $H=5$ 、 $D=2$, 调速器 $R=0.05$ 、 $T_R=7$ 、 $F_H=0.3$, 风电渗透率 $\rho=0.2$, 扰动 $\Delta P_L=0.1$ p.u., 风电机组综合惯量控制参数 $K_d=10$ 、 $K_p=10$ 的工况下, 图 4 给出系统频率的解析值和电磁暂态仿真结果。由图 4 可知, SFR 模型的频率波形与仿真结果基本一致, 两者的频率响应特征——最大频率变化率、频率最低点与稳态频率基本吻合, 故文中建立的频率响应模型有效。

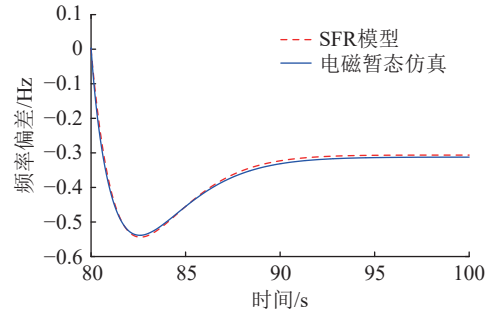


图 4 SFR 模型和电磁暂态仿真的频率波形对比

Fig.4 Comparison of frequency waveforms of electromagnetic transient simulation and SFR model

2 风电机组转速模型及风电调频控制参数整定

2.1 风电机组转速模型

风电机组在调频过程中需要始终满足其转速高于最低转速限制的条件, 否则将脱网运行。为保证运行的安全性, 需要在风电机组控制参数整定中将其列为合理约束条件, 因此有必要建立风电机组调频过程中的转速模型, 为下文的风电机组控制参数整定研究奠定基础。

图 5 给出系统频率故障后风电机组机械功率与电磁功率变化的轨迹。当系统处于稳态时, 风电机组运行在 A 点。故障后, 风电机组的电磁功率在综合惯量控制下沿着轨迹 ABC 移动, 其机械功率则

沿着轨迹 AD 移动。由图 5 可知,风电机组在调频过程中,其机械功率始终小于电磁功率,故转子转速在调频过程中不断下降。风电机组转速下降至最低限值 $\omega_{\min}$ 时风电机组将退出调频而进入转速恢复阶段,此时将会出现较为严重的频率二次跌落。

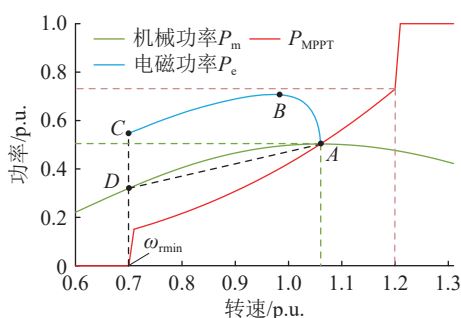


图 5 风电机组工作点切换轨迹

Fig.5 Switching trajectory of wind turbine working state

因此,文中考虑系统频率与风电机组转速的交互影响,在风电机组初始运行点对其转子运动方程进行线性化处理可得:

$$2H_w\omega_{r0}\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (9)$$

式中: H_w 为风电机组的惯性时间常数; ΔP_m 、 ΔP_e 分别为风电机组机械功率和电磁功率增量。

风电机组的机械功率是转子转速的复杂非线性函数,不便于计算。故文中采用割线 AD 来近似线性化风电机组的机械功率,可得:

$$\Delta P_m = k_1 \Delta\omega_r \quad (10)$$

其中:

$$k_1 = \frac{P_m(\omega_{rA}) - P_m(\omega_{r\min})}{\omega_{rA} - \omega_{r\min}} \quad (11)$$

式中: k_1 为割线 AD 的斜率; ω_{rA} 为 A 点对应的转速。

将式(10)代入式(9)可得风电机组转速的频域表达式为:

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{K_d s + K_p}{2H_w\omega_{r0}s - k_1} \Delta f(s) \quad (12)$$

对式(12)进行拉式反变换即可得风电机组转速的时域表达式。采用与 1.2 节相同的仿真参数,令风电机组的风速为 9 m/s,图 6(a)给出转速预测值与电磁暂态仿真的对比结果。由图 6(a)可知,文中建立的转速模型预测值与仿真结果基本吻合,因此该转速模型具有较高的精度。为验证不同工况下式(12)的准确性,令风电机组的风速为 10 m/s,图 6(b)给出转速预测值与电磁暂态仿真的对比结果。由图 6(b)可知,在前 5 s 内转速的预测值与仿真结果基本吻合,随着风电机组转速偏差的增大,两者出现一定误差,但在风电机组退出调频时刻 ($t=100$ s) 两者的误差仍小于 2%。综上,说明文中

建立的风电机组转速模型有效。

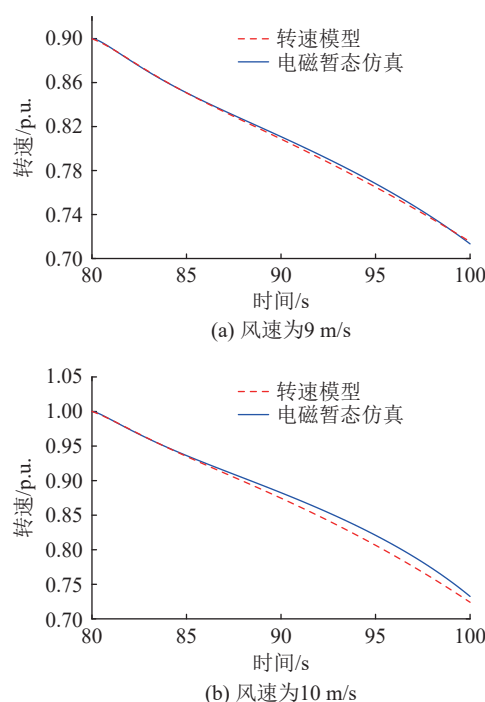


图 6 转速模型和电磁暂态仿真的转速波形对比

Fig.6 Comparison of rotor speed waveforms of electro-magnetic transient simulation and rotor model

2.2 风电调频参数整定方法

风电参与调频对 SFR 特性的提升作用取决于其控制参数的选择,故文中通过对系统频率指标的优化和合理约束,提出一种风电调频控制参数整定方法,以期在保证系统频率安全的前提下提升风电的调频效果。

当系统频率到达最低点时,系统频率变化率为零,故可根据式(7)求出系统频率到达最低点的时间 $t_{\min}$ 为:

$$t_{\min} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{1 + T_R \lambda_1}{1 + T_R \lambda_2} \quad (13)$$

将式(13)代入式(7)可得系统频率最大偏差 $\Delta f_{\max}$ 的表达式为:

$$\Delta f_{\max} = -\frac{\Delta P_L R}{D_e} \left\{ \frac{c_1}{\lambda_1} \left[\left(\frac{-c_1}{c_2} \right)^{\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} - 1 \right] + \frac{c_2}{\lambda_2} \left[\left(\frac{-c_1}{c_2} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}} - 1 \right] \right\} \quad (14)$$

根据式(14)可得到系统频率最大偏差与风电机组频率控制系数之间的关系,如图 7 所示。

由图 7 可知,系统的频率控制系数越大,系统的频率最低点越高,且下垂控制系数对频率最低点的影响更为明显。若风电机组的频率控制参数取值过小,则不能充分发挥其调频潜力;但风电机组

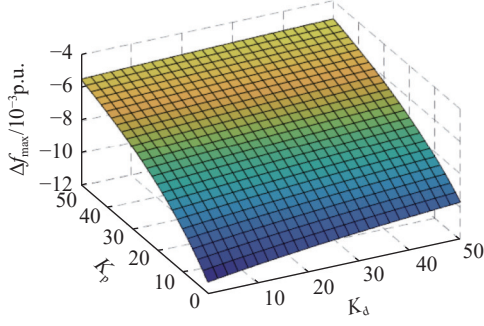


图7 频率最大偏差与综合惯量控制参数的关系

Fig.7 The relationship between $\Delta f_{\max}$ and integrated inertia control parameters

的频率控制参数并非越大越好,因为过大的频率控制系数会使转子转速快速下降至最低值,进而导致风电机组脱网。

综上,文中以提升系统的频率最低点为优化目标,定义优化目标函数为 $\min_{K_d, K_p} |\Delta f_{\max}|$ 。同时为保证系统的安全,还需要满足如下约束条件。

(1) 系统的最大频率变化率 $R_{\max}$ 一般出现在功率扰动的初始时刻,根据拉普拉斯初值定理可知系统频率变化率的约束为:

$$R_{\max} = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2 \Delta f(s) = \frac{\Delta P_L}{2(1-\rho)H + \rho K_d} \leq \eta_1 \quad (15)$$

式中: η_1 为最大频率变化率的上限。由式(15)可得风电机组虚拟惯量系数的取值范围为:

$$K_d \geq \frac{\Delta P_L}{\eta_1 \rho} - \frac{2(1-\rho)H}{\rho} \quad (16)$$

(2) 根据拉普拉斯终值定理可得系统稳态频率 Δf_{ss} 的约束为:

$$\Delta f_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta f(s) = \frac{\Delta P_L}{(1-\rho)\left(\frac{1}{R} + D\right) + \rho K_p} \leq \eta_2 \quad (17)$$

式中: η_2 为系统稳态频率偏差的上限。由式(17)可得风电机组下垂控制系数的取值范围为:

$$K_p \geq \frac{\Delta P_L}{\eta_2 \rho} - \frac{1-\rho}{\rho} \left(\frac{1}{R} + D \right) \quad (18)$$

(3) 为保证风电持续参与系统频率调节,需要保证其转速最低值高于转速下限。又由于风电机组在调频期间转子转速单调递减,故只需要令其在退出调频时刻的转速高于转速下限即可,由此可得风电机组转子转速的约束为:

$$L^{-1}(\Delta \omega_r(s))|_{t=t_{\text{off}}} > \omega_{r0} - \omega_{\min} \quad (19)$$

式中: t_{off} 为风电机组退出调频的时刻; $L^{-1}(\cdot)$ 为拉式反变换。另外,由于文中的优化目标为提升系统频率最低点,故不再将其列为约束条件。

文中所建立的优化问题是一个带约束的优化

问题,可以采用粒子群算法对其进行求解从而得到优化后的频率控制系数。文中所提风电频率控制参数整定方法可以根据系统功率扰动以及风电渗透率的不同动态选择风电机组的频率控制参数,能够适用于不同的应用场景。其中,系统的不平衡功率可以通过在线计算的方式得到。根据系统的转子运动方程可得:

$$\frac{2H_{\text{eq}}}{f_n} \times \frac{df}{dt} = \Delta P_L \quad (20)$$

其中:

$$H_{\text{eq}} = \rho K_d + (1-\rho)H \quad (21)$$

式中: H_{eq} 为系统的等效虚拟惯性时间常数; f 为系统频率; f_n 为系统额定频率。

由式(20)可知,利用预知的系统等效虚拟惯性时间常数与扰动发生瞬间测量的频率变化率即可获得系统的不平衡功率 ΔP_L 。为获得准确的估计值,一般使用高通滤波器来滤除信号中的噪声和随机干扰。

3 仿真算例

3.1 仿真设置

为验证文中所提风电调频参数整定方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建图8所示四机两区域仿真模型。仿真模型中主要包含3台火电机组和1个风电场,其中风电场包含若干台1.5 MW的风电机组,具体数量须根据系统的风电渗透率决定。系统的主要参数见表1和表2。

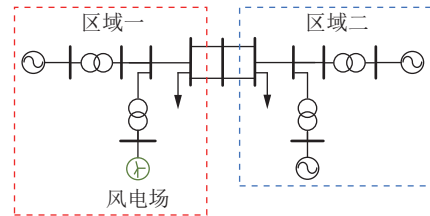


图8 仿真系统示意

Fig.8 Schematic diagram of simulation system

表1 同步发电机组仿真参数
Table 1 Simulation parameters of synchronous generators

参数	数值
额定容量/MW	900
额定电压/kV	20
惯性时间常数H/s	5
阻尼系数D	2
调差系数R	0.05
再热时间常数T _R /s	7
汽轮机高压缸做功比例F _H	0.3

表 2 风电机组仿真参数
Table 2 Simulation parameters of wind turbines

参数	取值
额定容量/MW	1.5
额定电压/kV	0.575
惯性时间常数 H_w/s	5.04
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	12
转子转速变化范围/p.u.	0.7~1.2
定子电阻/p.u.	0.007 06
定子电抗/p.u.	0.171
转子电阻/p.u.	0.005
转子电抗/p.u.	0.156

分别设定风电机组的风速为 9 m/s 和 10 m/s,在不同的功率扰动和风电渗透率下对比不同的调频控制参数方案:风电机组的综合惯量控制参数为最优调频参数的 0.5 倍(方案一);风电机组的综合惯量控制参数为经文中所提控制策略计算得到的值(方案二);风电机组的综合惯量控制参数为最优调频系数的 1.5 倍(方案三)。在风电调频参数整定策略中,不同文献对系统的最大频率变化率和稳态偏差亦有所不同^[27-28],文中取系统的最大频率变化率为 0.5 Hz/s,系统的稳态最大频率偏差为 0.4 Hz。另外,取风电机组的转速下限为 0.7 p.u。

3.2 风电调频参数整定方法验证

为验证文中所提风电调频控制参数整定方法的有效性,表 3 给出不同风速 v 下不同功率扰动和风电渗透率对应的风电最优调频控制参数。

表 3 控制参数优化结果
Table 3 Optimized results for control parameters

$v/(m \cdot s^{-1})$	$\Delta P_1/p.u.$	$\rho/\%$	K_d	K_p
9	0.10	20	24.27	9.79
9	0.10	30	23.67	9.17
9	0.08	20	24.14	12.78
10	0.10	20	24.78	15.81

3.2.1 算例 1: 风速为 9 m/s, 功率扰动为 0.1 p.u., 风电渗透率为 20%

在 $t=80$ s 时施加对应的功率扰动,3 种调频方案下系统的频率响应、风电机组转速以及输出有功功率曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,当采用方案一时,系统的最大频率偏差为-0.58 Hz,且风电机组结束调频时的最低转速为 0.82 p.u.,远高于其转速下限,风电机组的转子动能没有被充分利用,该方案的调频效果欠佳。而当采用优化后的控制系数时,系统的频率最低点和稳态频率较方案一皆有所提升,风电机组的最大

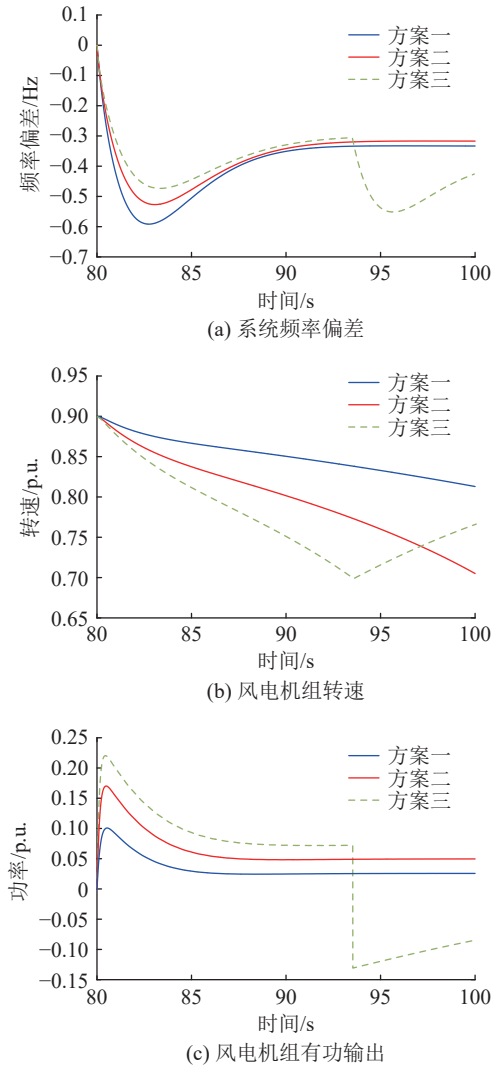


图 9 负荷突增时算例 1 的系统动态响应波形
Fig.9 System dynamic response waveforms of example 1 under load surge

频率偏差可提升至-0.53 Hz,且风电机组退出调频时的转速略高于 0.7 p.u.,接近其转速下限,由此可得文中所提的风电调频控制参数整定方案可以在保证安全的前提下充分发挥风电的调频潜力。方案三中,风电机组的调频控制参数设置偏大,虽然较方案二系统的频率最低点有进一步提升,但在 $t=93.528$ s 时,风电机组因响应过度达到运行下限从而进入转速恢复阶段,此时系统频率发生较为严重的二次跌落,其二次跌落值甚至比一次跌落值更低。由图 9(c)可知,方案三对应的风电机组输出功率在 $t=93.528$ s 时发生大幅跌落,风电机组的附加功率变为负值,即风电机组从系统中吸收有功功率,这也是系统频率发生二次跌落的原因。

3.2.2 算例 2: 风速为 9 m/s, 功率扰动为 0.1 p.u., 风电渗透率为 30%

为验证所提风电调频控制参数整定方法对不

同风电渗透率的适应性, 将算例 1 中的风电渗透率改为 30%。图 10 给出风电渗透率为 30% 时 3 种调频方案下系统的频率响应、风电机组转速以及输出有功功率的波形。由图 10 可知, 当采用方案一时, 由于风电机组的调频参数较小, 其调频潜力没有被充分利用, 系统的最大频率偏差为 -0.62 Hz。当采用方案二时, 系统的最大频率偏差能进一步提升至 -0.52 Hz, 略高于算例 1 中的结果, 这是因为系统中的风电渗透率更高时风电的调频能力更强。当采用方案三时, 系统的频率同样发生了二次跌落。

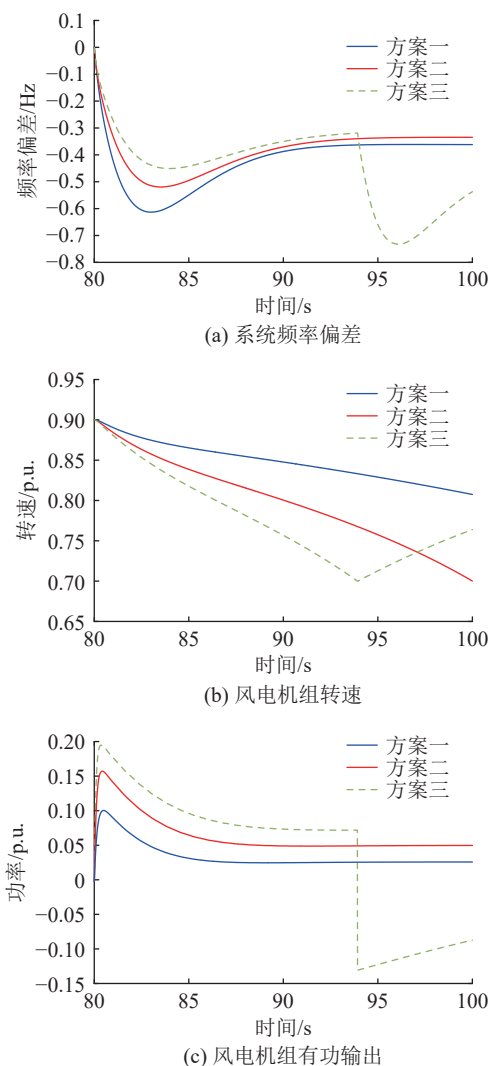


图 10 负荷突增时算例 2 的系统动态响应波形
Fig.10 System dynamic response waveforms of example 2 under load surge

3.2.3 算例 3: 风速为 9 m/s, 功率扰动为 0.08 p.u., 风电渗透率为 20%

为验证所提风电调频控制参数整定方法对不同功率扰动的适应性, 在 $t=80$ s 时施加 0.08 p.u. 的不平衡功率扰动。图 11 给出 3 种调频方案下系统的频率响应、风电机组转速以及输出有功功率的波

形。由图 11 可知, 采用方案三时同样发生了较为明显的频率二次跌落, 不利于系统的频率安全。采用文中整定后的调频控制参数可以有效避免频率恢复过程中出现的二次跌落现象, 且系统的最大频率偏差为 -0.4 Hz, 系统的频率最低点比算例 1 更高, 这是因为系统遭受的功率扰动变小。与算例 1 相似, 控制方案一风电机组转子动能的利用有限, 调频效果较差。

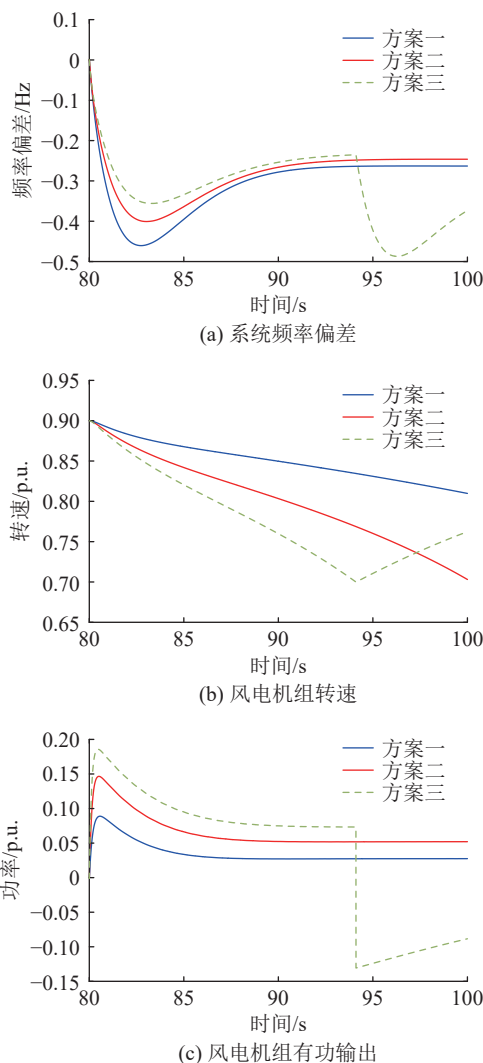


图 11 负荷突增时算例 3 的系统动态响应波形
Fig.11 System dynamic response waveforms of example 3 under load surge

3.2.4 算例 4: 风速为 10 m/s, 功率扰动为 0.1 p.u., 风电渗透率为 20%

为验证不同风速下所提控制方法的有效性, 设定风电机组的风速为 10 m/s, 在 $t=80$ s 时施加 0.1 p.u. 的不平衡功率扰动。图 12 给出风速为 10 m/s 时 3 种调频方案下系统的频率响应、风电机组转速以及输出有功功率的波形。由图 12 可知, 采用经文中整定后的控制参数既能充分发挥风电机组的调

频潜力,又能避免系统频率发生二次跌落。

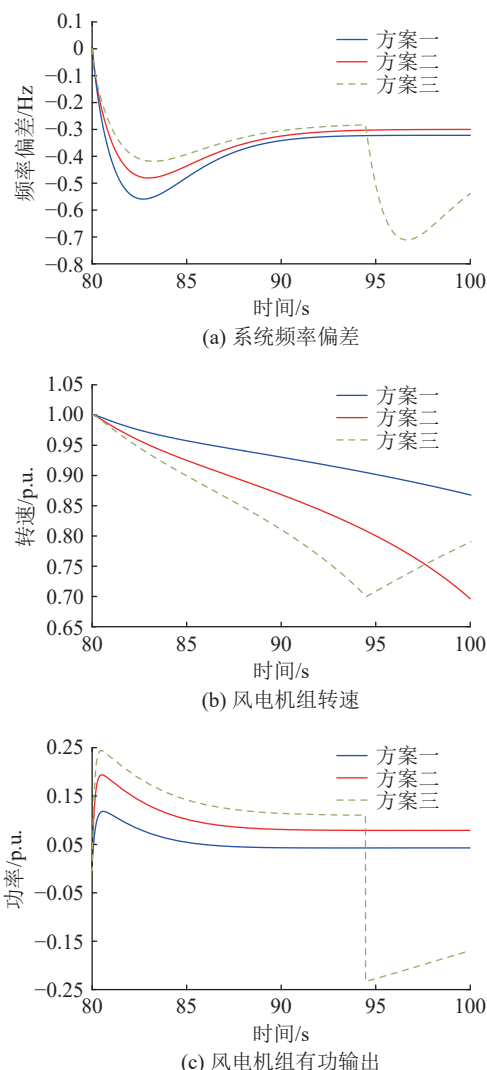


图 12 负荷突增时算例 4 的系统动态响应波形
Fig.12 System dynamic response waveforms of example 4 under load surge

4 结论

在风力发电占比不断攀升的背景下,合理整定风电的调频控制参数对改善系统频率特性具有重要意义。文中提出一种计及转速下限和频率安全约束的风电频率控制参数整定方法。通过理论分析和仿真研究得出以下结论:

(1) 建立包含多种类型调频电源的 SFR 模型,并基于此推导系统频率响应指标的表达式,通过仿真验证了所建频率响应模型能准确拟合系统的频率动态响应。

(2) 对风电机组的转子运动方程进行线性化,建立风电机组的转速模型,通过仿真验证了所建转速模型在不同风速工况下均能准确预测风电机组的转速,为风电调频控制参数整定方案奠定基础。

(3) 提出一种以提升系统频率最低点为目标,并将系统的频率变化率、稳态频率以及转子转速约束在合理范围内的优化问题来整定风电机组的调频控制参数。仿真结果验证了所提控制策略在不同风电渗透率以及功率扰动工况下,均能在保证系统频率安全的同时充分发挥风电机组的调频能力,且能有效避免系统频率的二次跌落。

参考文献:

- [1] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [2] 张礼浩, 刘翔宇, 顾雪平, 等. 新型电力系统频率安全稳定研究综述及展望[J]. 浙江电力, 2024, 43(10): 12-26.
ZHANG Lihao, LIU Xiangyu, GU Xueping, et al. Review and prospects of frequency security and stability research in new-type power systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(10): 12-26.
- [3] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [4] 孙建华, 王佳旭, 杜晓勇, 等. 考虑频率安全约束的高比例风电电力系统储能优化配置策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 151-162.
SUN Jianhua, WANG Jiaxu, DU Xiaoyong, et al. Optimization strategy for energy storage configuration in high proportion wind power system considering frequency safety constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 151-162.
- [5] 李东东, 董楠, 姚寅, 等. 考虑频率响应分散性及系统分区的含风电系统等效惯量估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 36-45.
LI Dongdong, DONG Nan, YAO Yin, et al. Equivalent inertia estimation of a power system containing wind power considering dispersion of frequency response and system partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 36-45.
- [6] 乔左江, 杜欣慧, 薛晴. 大规模风电参与系统调频研究综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 1-12.
QIAO Zuojia, DU Xinhui, XUE Qing. Review of large-scale wind power participating in system frequency regulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 1-12.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization

- Administration of the People's Republic of China. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [8] National Grid. Mandatory frequency response[EB/OL]. [2025-04-02]. <http://www2.nationalgrid.com>.
- [9] ZHAO C, SUN D, ZHANG X, et al. A two-stage power distribution scheme of multiple wind farms participating in primary frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5009-5021.
- [10] 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.
- [11] 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(S1): 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.
- [12] 张冠锋, 杨俊友, 王海鑫, 等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(S1): 83-92.
- ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, WANG Haixin, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind farm storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(S1): 83-92.
- [13] 张崇, 李博, 李笑宇, 等. 基于虚拟同步机控制参数自适应调节的储能系统调频方法[J]. *发电技术*, 2024, 45(4): 772-780.
- ZHANG Chong, LI Bo, LI Xiaoyu, et al. A frequency regulation method of energy storage system based on adaptive adjustment of virtual synchronous generator control parameters[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(4): 772-780.
- [14] 周涛, 向永建, 杜可可, 等. 风机与储能参与电网调频协调控制技术综述[J]. *浙江电力*, 2024, 43(7): 45-55.
- ZHOU Tao, XIANG Yongjian, DU Keke, et al. An overview of a coordinated control technique for wind turbines and energy storage participating grid frequency regulation[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(7): 45-55.
- [15] 张小莲, 孙啊传, 郝思鹏, 等. 风电场参与电网调频的多机协同控制策略[J]. *发电技术*, 2024, 45(3): 448-457.
- ZHANG Xiaolian, SUN Achuan, HAO Sipeng, et al. Multi-machine cooperative control strategy of wind farm participating in power grid frequency modulation[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(3): 448-457.
- [16] 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.
- [17] 胡家欣, 胥国毅, 毕天姝, 等. 减载风电机组变速变桨协调频率控制方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3656-3663.
- HU Jiaxin, XU Guoyi, BI Tianshu, et al. A strategy of frequency control for deloaded wind turbine generator based on coordination between rotor speed and pitch angle[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3656-3663.
- [18] VAN DE VYVER J, DE KOONING J D M, MEERSMAN B, et al. Droop control as an alternative inertial response strategy for the synthetic inertia on wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1129-1138.
- [19] LEE J, MULJADI E, SRENSSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 279-288.
- [20] 侍乔明, 王刚, 李海英, 等. 考虑调频能力的风电场虚拟惯量多机协同控制策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 4005-4017.
- SHI Qiaoming, WANG Gang, LI Haiying, et al. Coordinated virtual inertia control strategy of multiple wind turbines in wind farms considering frequency regulation capability[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4005-4017.
- [21] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5): 20-26, 33.
- TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 20-26, 33.
- [22] 王同森, 程雪坤. 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 29-36.
- WANG Tongsen, CHENG Xuekun. Variable droop coefficient control strategy of a DFIG considering rotor speed limit[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 29-36.
- [23] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制[J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1658-1665.
- LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Fuzzy adaptive virtual inertia control strategy of wind turbines based on system frequency response interval division[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1658-1665.
- [24] 许益恩, 杨德健, 郑太英, 等. 计及电网频率偏差的双馈风电机组频率控制策略[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 229-235.
- XU Yien, YANG Dejian, ZHENG Taiying, et al. Frequency control strategy of doubly-fed wind generators considering grid frequency deviation[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(10): 229-235.
- [25] 杨德健, 许益恩, 高洪超, 等. 计及转速平滑恢复的双馈风电机组自适应频率控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 172-179.
- YANG Dejian, XU Yien, GAO Hongchao, et al. Self-adaptive

- frequency control scheme of a doubly-fed induction generator with smooth rotor speed recovery[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 172-179.
- [26] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(3): 720-729.
- [27] GAO H S, XIN H H, HUANG L B, et al. Common-mode frequency in converter-integrated power systems: definition, analysis, and quantitative evaluation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4846-4860.
- [28] BADESA L, TENG F, STRBAC G. Conditions for regional frequency stability in power system scheduling: part I:

theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5558-5566.

作者简介:



张龙

张龙(2000),男,硕士在读,研究方向为新能源并网运行与控制技术(E-mail: 22110051@zju.edu.cn);

孙丹(1975),女,博士,教授,通信作者,研究方向为新能源发电系统运行与控制技术;

年珩(1978),男,博士,教授,研究方向为新能源并网运行与控制技术。

Parameter tuning method of frequency regulation for wind power considering rotor speed limit and frequency safety constraint

ZHANG Long^{1,2}, SUN Dan¹, NIAN Heng¹, BI Jiarui¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Nanchang Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330012, China)

Abstract: The wind turbine (WT) generally provides auxiliary frequency regulation through integrated inertia control, but its frequency regulation effect is greatly affected by control parameters. In this paper, the tuning of frequency control parameters is studied by considering the adjustable ability of the WT and the system frequency response index. Firstly, a system frequency response (SFR) model is established, which takes into account the participation of wind power and thermal power in frequency regulation, and the analytic expression of the frequency response indices is derived. Secondly, after linearizing the rotor motion equation of the WT, the rotor speed model is established, and its accuracy is verified under different wind speed conditions. Then, the control parameters of the WT are set up with the aim of raising the frequency nadir and considering the rotor speed limit and the safety constraint of the system frequency. Finally, the simulation results verify that the proposed frequency control parameter tuning method can fully utilize the rotor kinetic energy of the WT under the premise of ensuring the safety of the system frequency.

Keywords: wind turbine (WT); integrated inertia control; system frequency response (SFR) model; frequency safety constraints; rotor speed limit; parameter tuning

(编辑 陆海霞)