

计及工作点偏移的减载风电系统频率响应模型

张龙, 孙丹, 张旭, 年珩

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 随着风电并网容量不断升高,利用减载风电机组参与一次调频对保障系统频率稳定性具有重要意义。然而,风机的工作点会随其转速变化而发生偏移,使得风机的实际一次调频贡献小于期望值。为此,文中首先分析了频率故障后风电机组减载功率跟踪控制与综合惯量控制的交互影响,指出了风机工作点偏移导致其调频效果削弱的基本原理。其次,基于风机的转子运动方程推导了风电功频传递函数,建立了计及减载风电机组工作点偏移的系统频率响应模型,并利用最小二乘法对其进行降阶,推导了系统频率最低点的解析式。然后,针对虚拟惯量控制的频率恢复期间引起功率倒流、微分环节放大噪声等缺点,提出利用下垂控制替代综合惯量控制。同时,为使减载风电机组获得期望的调频效果,基于频率最低点和稳态频率指标对风机控制参数进行了修正,提出了两种等效下垂系数的计算方法。最后,在MATLAB/Simulink平台建立了四机两区域模型,验证了所提降阶方法及修正方法的有效性。

关键词: 风电机组; 系统频率响应模型; 降阶; 惯量控制; 等效下垂系数

0 引言

随着“碳达峰·碳中和”战略目标的不断推进,以风力发电为代表的新能源发电得到了越来越多的重视^[1]。然而,大规模风电接入后会恶化系统的频率特性:一方面,风电机组(wind turbine, WT)的转子因变流器的隔离与系统频率解耦,无法像同步机组(synchronous generator, SG)一样自主响应系统的频率变化^[2-3];另一方面,风电机组一般工作在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)状态,其出力具有随机性和波动性。综上所述可知,风电机组无法实现类似同步机组的惯量支撑与一次调频功能。因此,大规模风电并网后系统的等效惯量急剧降低,大功率扰动下系统的频率稳定问题凸显^[4]。为此,世界各国的并网导则对风电调频提出了新要求^[5-6]。

为使得风电机组主动参与系统频率调节,国内外对风电调频控制策略开展了一系列研究。其中,根据风机调频能量的来源可分为转子动能控制和功率备用控制。

1) 转子动能控制。该方法的主要思想为通过附

加控制环节使得风机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,使得风机参与系统的频率支撑。根据控制结构的不同,转子动能控制可分为虚拟惯量控制、下垂控制、综合惯量控制以及虚拟同步控制^[7-10]等。其中,虚拟惯量控制以频率变化率作为输入信号,存在对测频精度要求高、放大噪声等问题,且具有比下垂控制更长的功率延时^[11]。文献[12]所提的固定系数虚拟惯量控制对风机风速变化的适应性较差;文献[13]提出一种基于遗传算法的变系数虚拟惯量控制策略,能够根据风机的转速动态修改风机的控制参数,但该控制策略的执行过程较为复杂。同时,由于风机的转子动能有限,上述控制策略无法实现长时间的功率支撑,且在转速恢复过程中可能会出现频率二次跌落现象^[14-15]。

2) 功率备用控制。为使得风电机组具有持续的调频功率,实现类似同步机组的一次调频功能,许多文献提出对风电机组进行减载控制以预留调频备用功率。风电机组的减载控制可通过变桨控制^[16]、超速控制^[17]以及协调控制^[18]实现。超速法通过提高风机转速,使其偏离最大功率点从而预留功率,适用于中、低风速。变桨法通过控制桨距角以预留调频功率,可适用于全风速,但该方法的响应速度较慢,且因变桨控制损失的风能被直接舍弃。为了减

收稿日期: 2023-08-26; 修回日期: 2024-01-04。

上网日期: 2024-03-21。

国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(52325702)。

小风电机组的机械磨损,文献[19]以减小桨距角动作作为目标,提出一种风电场的限负荷控制方法,但没有考虑风电的调频控制;文献[20]结合超速法和变桨法的特点,在不同风速区间采用不同的减载控制策略,并对风机的调频控制参数进行了整定。然而,上述文献没有考虑风电机组减载功率跟踪控制与调频控制之间的交互影响,风机的一次调频能力被过度估计。事实上,风电机组减载功率曲线工作点会随着风机转速变化而偏移,这会削弱风机的调频效果,但目前系统在频率响应(system frequency response, SFR)模型中,考虑风电机组的转速动态未见深入研究。

为此,本文首先分析了风电机组减载功率跟踪控制与综合惯量控制之间的交互影响,指出了风机工作点偏移导致其调频效果削弱的原因为。然后,建立了考虑减载风电机组工作点偏移的系统频率响应模型,并对其降阶,再基于降阶后的模型推导了系统频率最低点的解析式。针对虚拟惯量控制存在的固有缺点,提出利用下垂控制来替代综合惯量控制。进一步,基于频率最低点和稳态频率指标对风机的控制参数进行了修正,旨在提高风电机组的一次调频能力。最后,通过在MATLAB/Simulink仿真平台搭建的四机两区域模型验证了所提方法的正确性。

1 减载风电机组的出力特性分析

为使风电机组参与系统的一次调频,需要进行减载备用。风电机组减载控制的基本原理如附录A图A1所示^[21]。考虑到桨距角的频繁启停会加剧风机的机械磨损,而减速点为不稳定的运行点,本文选用超速控制来实现风电机组的减载控制。超速法可以将损失的风能储存在风机的转子动能中,并用于后续的频率调节。若风电机组的减载系数为 d ,则其有功输出为:

$$P_{de} = (1 - d)P_{MPPT} = (1 - d)k\omega_r^3 \quad (1)$$

式中: P_{de} 为风机的减载功率; P_{MPPT} 为风机的MPPT控制功率; k 为风机的MPPT控制系数; ω_r 为风机的转子转速。

为使减载风电机组实现类似同步机的惯量支撑与一次调频功能,将系统频率变化率和频率偏差引入风机的功率控制环节中,得到减载风电机组综合惯量控制的原理如附录A图A2所示^[22]。当系统发生功率扰动时,综合惯量控制将产生一个附加功率指令叠加至风电机组的减载功率指令上。由此可得

风机的有功功率参考值 P_{ref} 为:

$$P_{ref} = P_{de} - (K_d s + K_p) \Delta f \quad (2)$$

式中: K_d 和 K_p 分别为风机的虚拟惯量和下垂控制系数; s 为微分算子; Δf 为系统频率偏差。

以系统功率突增为例,分析减载功率跟踪控制与综合惯量控制之间的交互影响。当系统负荷突增时,在综合惯量控制下,风机增大输出功率提供频率支撑,此时,其输出电磁功率与机械功率不再平衡,风电机组将通过减速来释放转子动能。由式(1)可知,在减载功率跟踪控制下 P_{de} 也会减小,从而抵消综合惯量控制产生的正功率,由此削弱风机的调频效果。为说明该影响,附录A图A3对比了不考虑和考虑风机工作点偏移时系统的频率和功率响应波形,其中 $K_d = K_p = 10$ 。由图A3可知,考虑风机工作点偏移导致的调频负作用时,系统的频率最低点与稳态频率较不考虑风机工作点变化影响时的期望值更低,风机的输出功率也低于其期望值。由此可见,风机工作点偏移会影响其输出功率,进而影响系统的频率响应特性,应在系统频率响应模型中予以考虑。

2 计及工作点偏移的系统频率响应模型

2.1 风电功频传递函数

图1给出了超速风机在调频期间工作点的变化轨迹。当系统处于稳态时,风机工作在平衡点A。频率故障后,风机通过综合惯量控制参与调频,其电磁功率沿曲线ABC逐渐趋向于MPPT指令;机械功率则沿曲线AC移动,且随着转速降低风机的机械功率不断升高,从而释放其减载功率,实现类似同步机组的一次调频功能。图中: P_{wm} 和 P_{we} 分别为风电机组的机械功率和电磁功率。

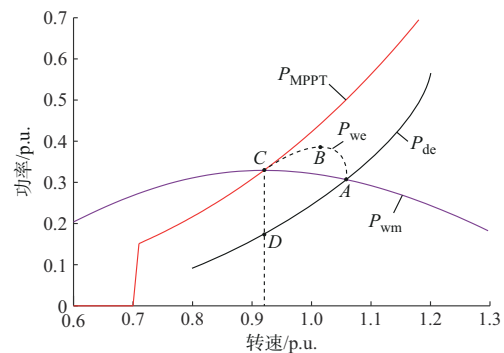


图1 减载风电机组工作点变化轨迹
Fig. 1 Variation trajectory of working points of deloaded wind turbines

为了刻画风机转速与系统频率的交互影响,对风机转子运动方程在初始工作点处线性化可得:

$$\Delta P_{wm} - \Delta P_{we} = 2H_w \omega_{r0} s \Delta \omega_r \quad (3)$$

式中: ΔP_{wm} 和 ΔP_{we} 分别为风机机械功率和电磁功率的增量; H_w 为风机的惯性时间常数; ω_{r0} 为风机的初始转速; $\Delta \omega_r$ 为风机转速增量。

由于风机的机械功率是转子转速的复杂非线性函数,不便于计算。由图1可知,减载风电机组在调频期间其机械功率变化不大,故本文考虑利用割线AC来近似线性化风机的机械功率,可得

$$\Delta P_{wm} = k_1 \Delta \omega_r \quad (4)$$

式中: k_1 为割线AC的斜率,其值为 $k_1 = [P_{wm}(A) - P_{wm}(C)] / (\omega_{rA} - \omega_{rC})$,其中, $P_{wm}(A)$ 和 $P_{wm}(C)$ 分别为对应风机A点和C点转速的机械功率, ω_{rA} 和 ω_{rC} 分别为A点和C点对应的转速。

同理,风机的减载功率指令变化可表示为:

$$\Delta P_{de} = k_2 \Delta \omega_r \quad (5)$$

式中: k_2 为割线AD的斜率,其值为 $k_2 = [P_{de}(A) - P_{de}(D)] / (\omega_{rA} - \omega_{rD})$ 。其中, $P_{de}(A)$ 和 $P_{de}(D)$ 分别为对应风机A点和D点转速的减载功率, ω_{rD} 为D点对应的转速。

由此可得调频期间风机的电磁功率变化量为:

$$\Delta P_{we} = k_2 \Delta \omega_r - (K_d s + K_p) \Delta f \quad (6)$$

将式(4)和式(6)代入式(3),可得风机转速与系统频率之间的关系为:

$$\Delta \omega_r = \frac{K_d s + K_p}{2H_w \omega_{r0} s + k_2 - k_1} \Delta f \quad (7)$$

再将式(7)代入式(6),可得风电输出功率变化量与系统频率之间的关系为:

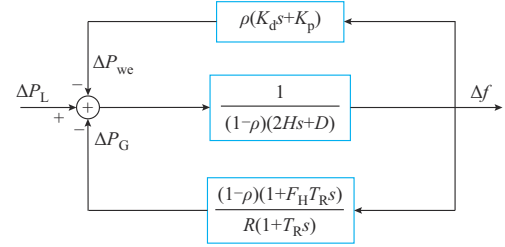
$$\Delta P_{we} = \left[\frac{k_2 (K_d s + K_p)}{2H_w \omega_{r0} s + k_2 - k_1} - (K_d s + K_p) \right] \Delta f \quad (8)$$

若不考虑风机工作点变化对其输出功率的影响,则频率故障期间风机的输出功率增量为:

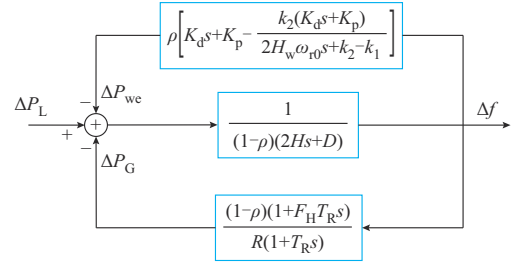
$$\Delta P_{we} = -(K_d s + K_p) \Delta f \quad (9)$$

基于式(8)和式(9)的风机功率控制环节,本文分别建立了不考虑和考虑风机工作点偏移时的系统频率响应模型(频率模型I和频率模型II),如图2所示。其中,模型II同时考虑了风电渗透率和风机的转速动态。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; ΔP_G 为火电机组的输出功率增量; ρ 为风电渗透率,其值为风电的装机容量与风电和火电的装机容量总和的比值; H 和 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 为火电机组汽轮机高压缸做功比例。



(a) 不考虑风机工作点偏移



(b) 考虑风机工作点偏移

图2 系统频率响应模型
Fig. 2 SFR model

由图2(b)可知,频率模型II对应的系统传递函数为:

$$G_{II}(s) = \left\{ (1-\rho)(2Hs+D) + \frac{(1-\rho)(1+F_H T_R s)}{R(1+T_R s)} + \rho \left[K_d s + K_p - \frac{k_2 (K_d s + K_p)}{2H_w \omega_{r0} s + k_2 - k_1} \right]^{-1} \right\} \quad (10)$$

经整理得:

$$G_{II}(s) = \frac{d_2 s^2 + d_1 s + d_0}{e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0} \quad (11)$$

式(11)中的参数见附录B式(B1)、式(B2)。

当系统中发生功率阶跃扰动时,可得系统频率的频域表达式为:

$$\Delta f_{II}(s) = -\frac{\Delta P_L}{s} G_{II}(s) \quad (12)$$

为验证本文所建频率响应模型的准确性,在MATLAB/Simulink中搭建如附录A图A4所示的四机两区域系统,系统主要参数见附录A表A1和表A2。在风电渗透率 $\rho=0.2$ 、功率扰动 $\Delta P_L=0.1$ p.u.、风机综合惯量控制参数 $K_d=K_p=10$ 的工况下,系统频率的解析值和电磁暂态仿真结果如附录A图A5所示。由图A5可知,频率响应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,即最大频率变化率、频率最低点与稳态频率基本吻合。因此,本文建立的频率响应模型有效。

2.2 基于模型降阶的频率最低点解析式

由式(11)和式(12)可知,考虑风机工作点变化时,系统频率响应模型的阶数较高,无法直接求出系统频率的解析式。为了得到系统频率最低点的解析式,本节拟采用最小二乘法对其进行降阶^[23]。假设降阶后的系统传递函数为:

$$R'(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \quad (13)$$

式中: a_0 、 a_1 、 b_0 、 b_1 分别为降阶模型的未知参数,具体表达式见附录B式(B3)一式(B5)。

由此可得降阶后的系统频率的频域表达式为:

$$\Delta f_{II}(s) = -\frac{\Delta P_L}{s} R'(s) \quad (14)$$

由式(14)可知,降阶后的系统为二阶系统。因此,可以通过拉普拉斯反变换得到系统频率的时域表达式为:

$$\Delta f_{II}(t) = -\Delta P_L \left[\frac{c_1 (e^{\lambda_1 t} - 1)}{\lambda_1} + \frac{c_2 (e^{\lambda_2 t} - 1)}{\lambda_2} \right] \quad (15)$$

其中

$$\lambda_1 = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4b_0}}{2}, \lambda_2 = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_0}}{2}$$

$$c_1 = \frac{a_1 \lambda_1 + a_0}{\lambda_1 - \lambda_2}, c_2 = \frac{a_1 \lambda_2 + a_0}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

当系统频率达到最低点时,系统频率变化率为零。因此,可根据式(15)求出系统频率到达最低点的时间为:

$$t_{\min} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{a_1 \lambda_1 + a_0}{a_1 \lambda_2 + a_0} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),可得系统频率最大偏差的表达式为:

$$\Delta f_{\max, II} = -\Delta P_L \left\{ \frac{c_1}{\lambda_1} \left[\left(\frac{-c_1}{c_2} \right)^{\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} - 1 \right] + \frac{c_2}{\lambda_2} \left[\left(\frac{-c_1}{c_2} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}} - 1 \right] \right\} \quad (17)$$

此外,系统频率变化率的最大值一般出现在初始时刻。根据拉普拉斯初值定理,可得系统的最大频率变化率为:

$$\max(R_{COF}) = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2 \Delta f(s) = \frac{\Delta P_L}{2(1-\rho)H + \rho K_d} \quad (18)$$

2.3 风电机组仅使用下垂控制的可行性分析

由式(17)可得,系统频率最低点和频率控制系数的关系如图3所示。由图3可知,风机的频率控制

系数越大,则系统频率最低点越高,且下垂系数变化对系统频率最低点的影响较虚拟惯性系数大得多,具有更高的灵敏度。此外,虚拟惯量控制还存在以下缺点:对测频环节的精度要求较高,伴随着更长的功率响应延时;微分环节会放大噪声,不利于系统的稳定;在频率恢复期间,虚拟惯量控制产生的附加功率为负值,会引起功率倒流,不利于系统的频率恢复。因此,下文将研究利用下垂控制来替代综合惯量控制。

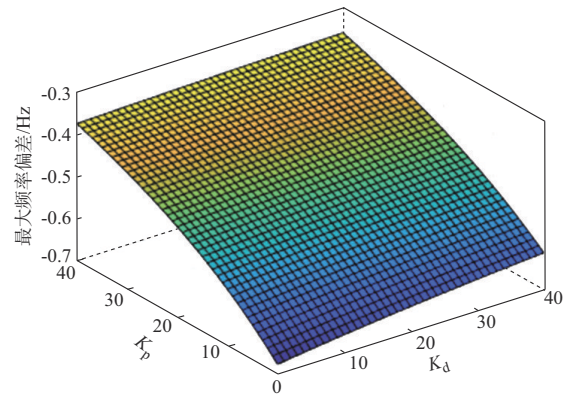


图3 最大频率偏差与综合惯量控制参数的关系
Fig. 3 Relationship between the maximum frequency deviation and integrated inertia control parameters

令仅使用下垂控制时系统的频率控制参数为:

$$\begin{cases} K_d = 0 \\ K_p = K_{p1} \end{cases} \quad (19)$$

式中: K_{p1} 为系统的等效下垂系数。同理,按照2.2节中的相同步骤,可得仅使用下垂控制时系统频率最低点的解析式。

需要指出,风机使用综合惯量控制时,在频率故障初期,虚拟惯量控制能够输出较大的暂态支撑功率,为一次调频控制争取更多的时间。由式(18)可得,若取消虚拟惯量环节,则会削弱系统的等效惯量,系统频率跌落得更快,频率最低点对应的时间也会提前。

3 基于频率响应指标的风机控制参数修正方法

由附录A图A3可知,考虑风机工作点变化对其输出功率的影响时,模型II对应的系统频率最低点与稳态频率均低于期望值。为达到预期的调频效果,本章基于频率最低点与稳态频率指标对风机的控制参数进行修正,提出了两种等效下垂控制系数的设定方法。值得说明的是,由于额定风速以上的风机转速为一定值,本文所提的参数修正方法仅适用于额定风速以下的风电机组。

3.1 修正方式1:频率最低点相等

令仅使用下垂控制的频率模型Ⅱ与使用综合惯量控制的频率模型Ⅰ对应的频率最低点相等,则有

$$\Delta f_{\max, \text{II}}(K_{p1}) = \Delta f_{\max, \text{I}}(K_d, K_p) \quad (20)$$

式中: $\Delta f_{\max, \text{II}}(K_{p1})$ 为频率模型Ⅱ对应的频率最低点; $\Delta f_{\max, \text{I}}(K_d, K_p)$ 为频率模型Ⅰ对应的频率最低点。具体推导过程见附录C。

由于系统频率最低点的表达式过于复杂,难以直接得到修正后的等效下垂系数与原综合惯量控制系数之间的显式解析表达式。因此,当风电渗透率为20%且系统的功率扰动为0.1 p.u.时,本文采用数值方法求解式(20),得到修正后下垂系数与原综合惯量控制系数的关系如附录A图A6所示。由图A6可知,为取得与综合惯量控制一致的频率最低点,等效后的下垂系数大于综合惯量控制中的下垂系数。因此,所提修正方法不仅能有效提升系统的频率最低点,而且能进一步提升系统稳态频率。

3.2 修正方式2:稳态频率相等

1)计算期望稳态频率。根据图2(a)可得,频率模型Ⅰ的系统传递函数为:

$$G_1(s) = \left[(1-\rho)(2Hs + D) + \frac{(1-\rho)(1 + F_H T_R s)}{R(1 + T_R s)} + \rho(K_d s + K_p) \right]^{-1} \quad (21)$$

由此可得系统频率的表达式为:

$$\Delta f_1(s) = -\frac{\Delta P_L}{s} G_1(s) \quad (22)$$

对式(22)运用拉普拉斯终值定理,可得频率模型Ⅰ对应的稳态频率为:

$$\Delta f_{ss\text{I}} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta f(s) = \frac{\Delta P_L}{(1-\rho)\left(\frac{1}{R} + D\right) + \rho K_p} \quad (23)$$

2)计算实际稳态频率。对式(12)运用拉普拉斯终值定理,可得频率模型Ⅱ对应的稳态频率为:

$$\Delta f_{ss\text{II}} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta f(s) = \frac{\Delta P_L}{(1-\rho)\left(D + \frac{1}{R}\right) + \rho \frac{K_{p1} k_1}{k_1 - k_2}} \quad (24)$$

令两个频率模型的稳态频率相等,可得风机的等效下垂控制系数为:

$$K_{p1} = K_p \frac{k_1 - k_2}{k_1} \quad (25)$$

由式(25)可知,只需将模型Ⅰ中的下垂系数乘

以一个放大因子,即可得到修正后的等效下垂系数。因此,采用修正后的等效下垂系数能够有效提升系统的稳态频率,从而提升风机的一次调频能力。

4 仿真实验

为了验证本文所提模型降阶方法以及等效下垂系数设定方法的有效性,在MATLAB/Simulink仿真平台搭建如附录A图A4所示的四机两区域仿真模型。仿真模型中主要包含三台火电机组和一个风电场,其中,风电场由450台1.5 MW的风机组成,同步机的总装机容量为2 700 MW,系统的风电渗透率为20%。另外,假定风机的风速恒定且为9 m/s,系统的有功负荷为1 800 MW,系统的额定频率为60 Hz。在仿真时间 $t=80$ s时,负荷突增340 MW。

4.1 模型降阶方法的有效性验证

为了验证本文所提模型降阶方法的正确性,取风机的频率控制系数 $K_d=K_p=10$ 。图4(a)给出了利用本文中的降阶方法和文献[24]中的劳斯近似法降阶后的频率波形与系统频率的时域仿真波形对比结果。由图4(a)可知,采用本文所提方法降阶后,系统的频率响应与降阶前基本一致,具有较高的精度。然而,采用劳斯近似法进行降阶后,系统的频率最低点和稳态频率与降阶前的频率指标之间误差较大。同时,为了说明本文所提降阶方法在不同控制参数下的有效性,图4(b)给出了不同控制参数下,降阶后系统频率最低点解析值与时域仿真得到的频率最低点之间的误差。由图4(b)可见,两者的频率最低点十分接近,误差几乎可忽略。因此,采用本文降阶方法推导的频率最低点解析式有效。

4.2 基于频率响应指标的修正方法有效性验证

4.2.1 修正方式1

为了验证文中所提基于频率最低点相等的等效下垂系数设定方法的有效性,设置风机的综合惯量控制系数为 $K_d=10, K_p=20$ 。由附录A图A6可知,在频率最低点相等的条件下,仅使用下垂控制时的等效下垂系数为 $K_{p1}=22.47$ 。图5给出了不考虑工作点偏移时综合惯量控制和考虑工作点偏移时仅使用下垂控制的系统频率和风机输出功率波形。

由图5(a)可知,采用修正后的等效下垂系数后,风机在仅使用下垂控制时能获得与原综合惯量控制相同的频率最低点,但系统频率最低点出现的时间有所提前,这是因为取消虚拟惯量控制导致系统等效惯量减小,与理论分析一致。同时,由于风机的下垂控制系数较修正前有所提高,系统的稳态频率也有所提高。

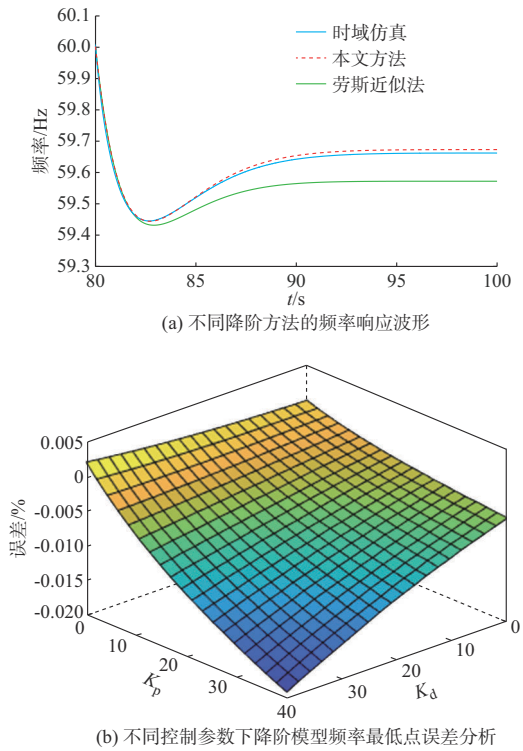


图4 降阶模型准确度分析
Fig. 4 Accuracy analysis of reduced-order model

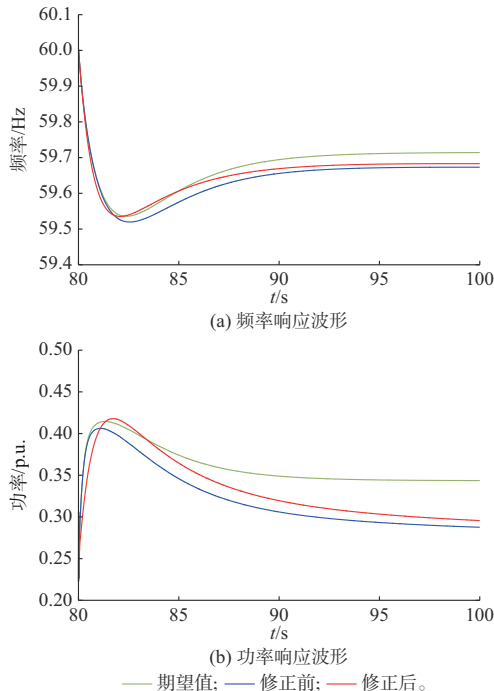


图5 修正方式1下系统的动态响应波形
Fig. 5 Dynamic response waveforms of system in modification mode 1

在频率故障初期,系统的频率变化率较大而频率偏差较小,而风机的虚拟惯量功率与频率变化率成正比,下垂功率与频率偏差成正比。因此,在频率

故障初期,风机输出功率在虚拟惯量控制下突增,此时的虚拟惯量控制占主导地位。由图5(b)可知,仅使用下垂控制时,风机的输出功率在功率扰动初期较修正前有所降低,但随着系统频率偏差的增大而不断升高,在频率最低点处能够提供比修正前更大的功率输出,从而有效提升系统频率最低点。

4.2.2 修正方式2

为了验证文中所提基于稳态频率相等的等效下垂系数设定方法的有效性,设置风机的综合惯量控制系数为 $K_d=K_p=10$ 。设置风机的减载系数为10%,由此可得风机的初始转速为1.065 p.u.。根据图1可以计算出 $(k_1 - k_2)/k_1$ 为3.951,故可得修正后的等效下垂系数为39.51。图6给出了不考虑工作点偏移时风机综合惯量控制和考虑工作点偏移时仅使用下垂控制的系统频率和风机输出功率波形。

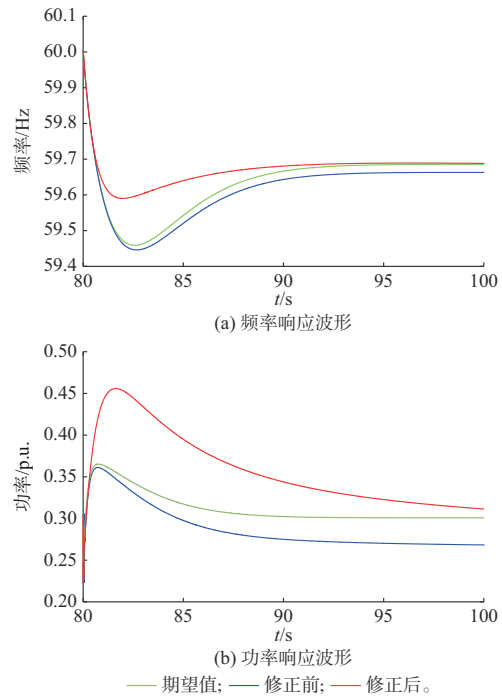


图6 修正方式2下系统的动态响应波形
Fig. 6 Dynamic response waveforms of system in modification mode 2

由图6(a)可知,修正前系统的稳态频率为59.66 Hz,低于期望的稳态频率;而采用本文修正方法后,系统的稳态频率提高至59.69 Hz,与期望值一致。这是因为修正后的等效下垂系数远大于原综合惯量控制中的下垂系数,风机的下垂控制输出功率弥补了由于工作点偏移导致的功率缺额,使得风机的稳态输出功率达到期望值。此外,在前5s内修正前的频率响应曲线与期望值基本一致,两者的频率

最低点相差不大,这是因为此时系统的转速变化不大,因工作点偏移导致的功率减少可忽略不计。由图6(b)可知,采用修正后的下垂系数后,系统的输出功率相较于修正前显著提高,在有效提升系统稳态频率的同时,大大提高了系统的频率最低点。同样,由于取消了虚拟惯量环节,系统频率最低点出现的时间也有所提前。

5 结语

本文在分析减载风电机组功率跟踪控制与综合惯量控制交互影响的基础上,建立了考虑工作点偏移的系统频率响应模型,并对其进行了降阶。随后,在控制结构和控制特性上对风机的控制参数进行了修正。通过理论分析与仿真验证可得出如下结论:

1) 风机在调频过程中的转速变化会导致其工作点发生变化。此时,风机的减载功率跟踪控制会削弱其调频效果,使得风机的调频输出功率低于期望值,从而导致系统的频率最低点和稳态频率也低于期望值。

2) 考虑风机工作点偏移建立的频率响应模型阶数较高,无法直接得到系统频率最低点的解析式。为此,利用最小二乘法对其进行降阶,并推导了系统频率最低点的解析式。仿真结果验证了本文降阶方法的高精度以及频率最低点解析式的准确性。

3) 基于频率最低点和稳态频率指标,对风机的控制参数提出了两种修正方法。所提修正方法不仅能够避免虚拟惯量控制的不利影响,而且能有效提升风机的调频效果。其中,基于频率最低点的等效下垂系数修正方法能够部分补偿因工作点偏移导致的功率减小,基于稳态频率的等效下垂系数修正方法能够完全补偿因工作点偏移导致的功率减少,从而有效提升了系统的一次调频能力。

本文所建立的系统频率响应模型仅包含单台风电机组,后续将继续研究尾流效应影响下风电场参与调频的系统频率响应模型。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 国家能源局. 我国风电并网装机突破3亿千瓦[EB/OL]. (2021-11-30) [2022-05-09]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/30/c_1310343188.htm.

National Energy Administration. The grid-connected installed capacity of wind power in China exceeded 300 GW [EB/OL]. (2021-11-30) [2022-05-09]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/30/c_1310343188.htm.

- [2] 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.
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.
- [3] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.
- [4] 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): 1-25.
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): 1-25.
- [5] 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.
- [6] National Grid (Great Britain). Grid code documents: connection conditions [EB/OL]. [2022-05-15]. <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/Codes/gridcode/gridcodedocs/>.
- [7] 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.
- [8] 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 of inertia and primary frequency modulation of doubly-fed wind turbine based on rotor kinetic energy and super capacitor energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement 1): 179-190.
- [9] 单煜,汪震,周昌平,等. 基于分段频率变化率的风电机组一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 19-26.
SHAN Yu, WANG Zhen, ZHOU Changping, et al. Control strategy of primary frequency regulation for wind turbine based on segmented rate of change of frequency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 19-26.

- [10] 高澈,田新首,李琰,等.基于运行状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制[J].电网技术,2018,42(2):517-523.
GAO Che, TIAN Xinshou, LI Yan, et al. Adaptive virtual synchronous generator control of DFIG based on operation state evaluation [J]. Power System Technology, 2018, 42 (2) : 517-523.
- [11] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [12] 曹军,王虹富,邱家驹.变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(13):78-82.
CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 78-82.
- [13] 兰飞,潘益丰,时萌,等.双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J].电力系统自动化,2019,43(12):51-59.
LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient virtual inertia control for DFIG-based wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (12) : 51-59.
- [14] 张雯欣,吴琛,黄伟,等.考虑频率二次跌落系统频率特征评估及风电调频参数整定[J].电力系统自动化,2022,46(8):11-19.
ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Evaluation of system frequency characteristic and parameter setting of frequency regulation for wind power considering secondary frequency drop [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 11-19.
- [15] 乔颖,郭晓茜,鲁宗相,等.考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J].电网技术,2020,44(3):807-815.
QIAO Ying, GUO Xiaoqian, LU Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 807-815.
- [16] 吴子双,于继来,彭喜云.大风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J].电工技术学报,2013,28(5):112-119.
WU Zishuang, YU Jilai, PENG Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119.
- [17] 蔡国伟,钟超,吴刚,等.考虑风电机组超速减载与惯量控制的电力系统机组组合策略[J].电力系统自动化,2021,45(16):134-142.
CAI Guowei, ZHONG Chao, WU Gang, et al. Unit commitment strategy of power system considering overspeed load reduction and inertia control of wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (16) : 134-142.
- [18] 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.
- [19] 张三洪,党杰,戴剑丰,等.考虑最优转速与桨距角控制的风电场限功率优化控制策略[J].电网技术,2021,45(5):1844-1851.
ZHANG Sanhong, DANG Jie, DAI Jianfeng, et al. Optimal control strategy for wind power curtailment considering optimal speed and pitch angle control [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1844-1851.
- [20] 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.
- [21] 张旭,陈云龙,岳帅,等.风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望[J].电网技术,2018,42(6):1793-1803.
ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, et al. Retrospect and prospect of research on frequency regulation technology of power system by wind power [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1793-1803.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Xu, ZHAO Chen, MA Junchao, et al. Optimized auxiliary frequency control of wind farm based on piecewise reduced-order frequency response model [J/OL]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy: 1-12 [2023-09-19]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10255430>.
- [24] HUTTON M, FRIEDLAND B. Routh approximations for reducing order of linear, time-invariant systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1975, 20(3): 329-337.
- 张 龙(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源并网运行与控制。
- 孙 丹(1975—),女,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:交流电机高性能控制、新能源并网运行控制技术。E-mail:sundan@zju.edu.cn
- 张 旭(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向:风电惯量评估与控制技术。

(编辑 章黎)

System Frequency Response Model of Deloaded Wind Power System Considering Working Point Shifting

ZHANG Long, SUN Dan, ZHANG Xu, NIAN Heng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the increasing grid-connected capacity of wind power, using deloaded wind turbines (WTs) to participate in the primary frequency regulation is of great significance in safeguarding system frequency stability. However, the working point of the WT shifts with its rotational speed change, which results in the actual capacity of the primary frequency regulation of the WT smaller than the desired value. Therefore, the interaction between the power tracking control of deloaded WT's and the integrated inertia control after a frequency fault is firstly analyzed, and the basic principle that the working point shifting of the WT's leads to the weakening of the frequency regulation effect is pointed out. Secondly, the wind power-frequency transfer function is derived based on the rotor motion equation of the WT's, and the system frequency response (SFR) model is established considering the working point shifting of the deloaded WT's. The least square method is also used to reduce the order of the proposed SFR model, and an analytical formula of the system frequency nadir is deduced. Then, in view of the shortcomings of virtual inertia control, such as power backflow during the frequency recovery and noise amplification in differential links, it is proposed to replace the integrated inertia control with droop control. Meanwhile, in order to make the deloaded WT's obtain the desired frequency regulation effect, the control parameters of the WT's are modified based on the frequency nadir and the steady state frequency indices, and calculation methods for the two equivalent droop coefficients are proposed. Finally, a four-machine two-region model is established on the MATLAB/Simulink platform to verify the effectiveness of the proposed order reduction method and the correction method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52325702).

Key words: wind turbine; system frequency response model; order reduction; inertia control; equivalent droop coefficient

