

基于自适应控制的分数阶虚拟同步机控制技术

赵哲¹, 陈曦^{1,2}

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 智慧能源技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:针对传统虚拟同步发电机(VSG)控制策略下,恒定的虚拟惯量和阻尼系数会导致系统失去灵活性,且引入的虚拟惯性会导致系统在扰动下出现动态振荡、功率超调现象,并且系统响应速度也会受到影响,提出一种自适应分数阶虚拟同步机(AC-FO-VSG)控制方法。首先,根据VSG控制小信号模型和分数阶虚拟惯性的Bode图分析虚拟惯量、阻尼系数和分数阶数对系统输出特性的影响,然后设计一种自适应分数阶VSG控制策略,该策略一方面将VSG中的虚拟惯性环节替换成分数阶虚拟惯性环节,从而降低了系统控制阶数;另一方面采用自适应控制函数对系统惯性和阻尼系数进行动态调节,以增加系统可调参数自由度,二者协同作用,最终达到抑制系统动态振荡与功率超调、提高系统响应速度的效果。最后,通过仿真验证了所提控制策略在应对有功指令突变和频率阶跃扰动工况下的可行性与优越性。

关键词:虚拟同步发电机;虚拟惯量;阻尼系数;分数阶微积分;自适应控制

中图分类号:TM61 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26686

Adaptive Fractional-order Control Strategy for Virtual Synchronous Generators

ZHAO Zhe¹, CHEN Xi^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: Addressing the issues that constant virtual inertia and damping coefficients in traditional virtual synchronous generator (VSG) control strategies impede system flexibility, slow down the response speed, and may cause dynamic oscillations and power overshoot phenomena under disturbances due to the introduced virtual inertia, an adaptive control- fractional-order- virtual synchronous generator (AC-FO-VSG) control method was proposed. Firstly, the influence of virtual inertia, damping coefficient, and fractional order on the system output characteristics was analyzed based on the VSG small-signal model and Bode diagrams of fractional-order virtual inertia. Subsequently, an adaptive fractional-order VSG control strategy was designed. This strategy replaces the virtual inertia link in the virtual synchronous generator with a fractional-order virtual inertia link, thereby reducing the system order. Concurrently, it employs an adaptive control function to dynamically adjust the system's inertia and damping coefficients, increasing the freedom to adjust parameters. These two aspects work together, ultimately achieving the effects of suppressing dynamic oscillations and power overshoots while enhancing the system response speed. Finally, simulations were performed to validate the proposed control strategy under active power command changes and frequency step disturbances. Simulation results validate the proposed control method's feasibility and superiority.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); virtual inertia; damping coefficient; fractional-order calculus; adaptive control

随着风电、光伏等新能源大规模接入电网, 效惯量水平显著下降^[1], 传统同步发电机主导的电力电子设备渗透率持续攀升, 导致电力系统等效惯量响应机制面临根本性变革, 在负荷突变与新

作者简介: 赵哲(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制, Email: 1552776051@qq.com

通讯作者: 陈曦(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为微网化学储能技术, Email: 15047513635@163.com

能源出力波动叠加工况下,系统功率失衡易引发频率快速偏移,低惯量特性将加剧频率波动幅度,甚至触发频率越限保护^[2-3],针对新能源并网导致的系统惯量缺失问题,国内外学者提出采用虚拟同步发电机(VSG)技术^[4],通过电力电子控制算法模拟同步发电机转子的惯量响应特性与电磁暂态过程,使并网逆变器具备类同步机的阻尼和惯性支撑能力^[5-6]。

但是传统VSG控制由于固定的惯量和阻尼系数而失去了逆变器控制的灵活性,响应速度会变慢。因此有学者提出通过随着工况变化调整惯量和阻尼系数来增强系统的动态性能。文献[7]提出基于Bang-Bang算法的转动惯量交替变化的阈值触发式断续控制策略。然而,该方法在惯量参数阶跃切换过程中易引发功率波动,暴露出固定阈值调节机制的局限性。文献[8]对虚拟惯量和阻尼系数进行自适应调节,但参数是离散变化的,同时存在上述参数阶跃切换过程中易引发功率波动的问题。文献[9-10]通过建立惯性和阻尼参数与频率之间的函数关系,实现了惯性和阻尼参数连续变化,从而解决了参数突变产生的问题。文献[11]通过建立小信号模型,针对惯性对功率和角频率的影响展开分析,提出了功率和频率动态响应的双自适应控制,根据不同的运行条件实现功率调节和频率调节之间的平衡,并给出了参数设计的原则。

然而改变惯性和阻尼参数终究无法改变VSG的本质,因为引入的虚拟惯性会导致系统在扰动下出现动态振荡和功率超调现象,系统的响应速度也会受到影响^[12]。因此,基于分数阶微积分^[13]的改进VSG(fractional-order virtual synchronous generator, FO-VSG)控制策略被提出,通过改变控制器中分数阶微分、积分环节的阶数,实现对系统功率振荡和频率波动的抑制,同时加快系统响应速度。文献[14]提出了一种基于有功分数阶微分校正的虚拟同步发电机控制策略,在有功功率-频率控制环路引入了分数阶微分运算和由虚拟惯量与有功下垂系数组成的一阶低通滤波器对系统有功功率响应进行控制,可以改善系统有功响应性能。文献[15-16]对分数阶虚拟惯性环节的频域进行分析,通过改变分数阶的阶数来有效改善有功功率的动态性能,但是该控制方法存在可调参数不够灵活的缺点。

鉴于此,本文提出AC-FO-VSG控制策略,首

先建立VSG的数学模型,分析自适应控制原理和分数阶惯性环节对系统的响应特性,然后设计自适应控制调节FO-VSG的转动惯量和阻尼系数并应用于分数阶VSG控制器。最后,通过Matlab/Simulink建立仿真模型,验证了所提控制方法在抑制动态振荡、功率超调和提高响应速度方面的可行性和优越性。

1 VSG模型

1.1 VSG的结构及原理

图1为VSG系统架构:光伏单元采用最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,混合储能需平抑电网功率需求与光伏波动,以维持功率平衡及直流母线电压稳定;VSG控制器输出的指令电压信号经电压外环生成电流参考值,该参考值通过电流内环实时跟踪调节,最终由空间矢量调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)模块生成驱动变流器开关器件的脉冲信号。

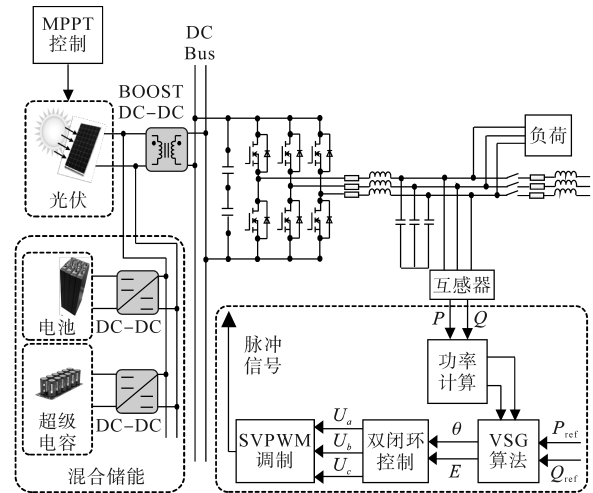


图1 VSG系统架构

Fig.1 Schematic diagram of VSG structure

VSG虚拟调速控制算法主要是以同步发电机的机械转子运动方程为基础,根据机械转矩与系统有功频率变化之间的关系,可得:

$$T_m - T_e = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + D(\omega_0 - \omega) \quad (1)$$

式中: T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; J, D 分别为虚拟转动惯量和阻尼系数; ω, ω_0 分别为VSG的角速度和额定角速度。

由式(1)的机械转矩方程可以得到VSG的转子运动方程:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式中: P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率。

由式(2)VSG的转子运动方程可以得到有功功率-频率之间的关系:

$$P_m = P_0 + k_f(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

式中: k_f 为虚拟调速器调节系数; P_0 为有功功率给定值。

由式(3)可知,虚拟调速器调节系数决定系统对频率变化量的反应程度。

无功功率-电压下垂控制方程为

$$E = E_0 - k_u(Q_{out} - Q_0) \quad (4)$$

式中: k_u 为虚拟励磁装置调节系数; E_0 为电压参考值; E 为VSG控制器输出的指令电压; Q_{out} , Q_0 分别为VSG输出无功功率、参考电压对应的无功功率。

根据图1的VSG系统架构和功率传输理论,当线路阻抗为感性时,VSG输出功率近似表示为

$$P_e = \frac{3EU_g \sin \delta}{Z_g} \approx \frac{3EU_g}{Z_g} \delta = K_p \delta \quad (5)$$

式中: Z_g 为电网等效电抗; K_p 为同步电压系数; δ 为功角。

1.2 自适应控制原理

虚拟同步发电机控制中,转动惯量参数 J 和阻尼系数 D 作为核心可调量,其设定值直接决定了系统有功功率 P 与频率 f 的动态响应特性。虚拟同步发电机的有功功率 P 和无功功率 Q 输出可基于视在功率的矢量特性,通过正交分解方法进行独立推导,具体数学关系如下式所示:

$$\begin{cases} P = \frac{EU \cos(\theta - \delta)}{Z} - \frac{U^2 \cos \theta}{Z} \\ Q = \frac{EU \sin(\theta - \delta)}{Z} - \frac{U^2 \sin \theta}{Z} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \\ \theta = \arctan(\omega L/R) \end{cases} \quad (7)$$

式中: U 为机端电压; Z 为VSG滤波电路的阻抗; θ 为VSG滤波电路的阻抗角。

结合式(1)和式(3)得到有功-频率控制的小信号模型如图2所示。

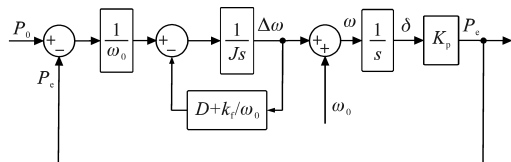


图2 有功-频率控制的小信号模型

Fig.2 Small-signal model of active power-frequency control

根据同步发电机的小信号模型分析方法可以得到虚拟同步发电机频率和有功功率的传递函数:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{\Delta \omega}{\Delta P_0} = \frac{s}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + k_f)s + K_p} \\ G_2(s) = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_0} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + k_f)s + K_p} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta \omega$ 为角速度变化量; ΔP_0 为给定有功功率变化量; ΔP_e 为电磁功率变化量。

根据式(8)得到VSG二阶模型的自然振荡角频率 ω_n 和阻尼系数 ξ :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K}{J\omega_0}} \\ \xi = \frac{D\omega_0 + k_f}{2} \sqrt{\frac{1}{JK\omega_0}} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中,若取 $0 < \xi < 1$ 、误差带为 $\pm 5\%$,二阶系统对应的超调量 $\sigma\%$ 和调节时间 t_s 为

$$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% \quad (10)$$

$$t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = \frac{3.5}{(D\omega_0 + k_f)/(2J\omega_0)} \quad (11)$$

结合式(8)和式(9)分析可知,在指定功率需求的情况下,VSG二阶系统的动态性能可以被转动惯量 J 和阻尼系数 D 影响,具体分析时,假设 D 恒定不变时, ξ 随着 J 的增大而变小,从而调节时间 t_s 随着超调量 $\sigma\%$ 的变大而变长;假设 J 恒定不变时, ξ 随着 D 的增大而变大,从而调节时间 t_s 随着超调量 $\sigma\%$ 的变小而变短。变转动惯量/阻尼下的有功动态响应如图3所示。根据图3分析得:有功功率动态响应中的振荡频率特性由虚拟同步发电机的转动惯量 J 决定,振荡模态的衰减速率则由阻尼系数 D 决定;过高的 J 值将显著加剧有功阶跃响应的功率波动幅值,从而降低电力系统的暂态稳定性。

分析转动惯量 J 和阻尼系数 D 对虚拟同步发电机的 f 输出特性的影响。根据式(1)可得:

$$\Delta \omega = \frac{T_m - T_e - Jd\omega/dt}{D} \quad (12)$$

$$\frac{T_m - T_e - D(\omega_0 - \omega)}{J} = \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

式(12)中假设 $T_m - T_e - Jd\omega/dt$ 为定值时,频率偏差 $\Delta \omega$ 会随着阻尼系数 D 的增大而变小;同样的,式(13)中,假设 $T_m - T_e - D(\omega_0 - \omega)$ 为定

值时,角速度变化率 $d\omega/dt$ 会随着转动惯量 J 的增大而变小。为维持电网频率稳定,通过转动惯量 J 和阻尼系数 D 来控制频率偏差 $\Delta\omega$ 和角速度变化率 $d\omega/dt$ 。

图4为变转动惯量/阻尼下的频率动态响应。

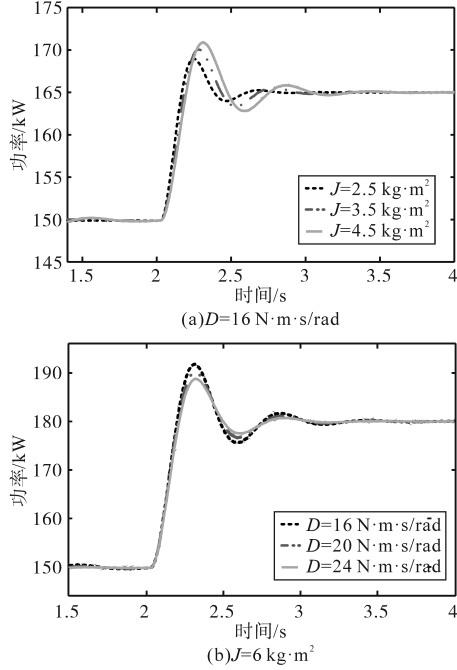


图3 变转动惯量/阻尼下的有功动态响应

Fig.3 Active power output behavior during modulation of system inertia and damping

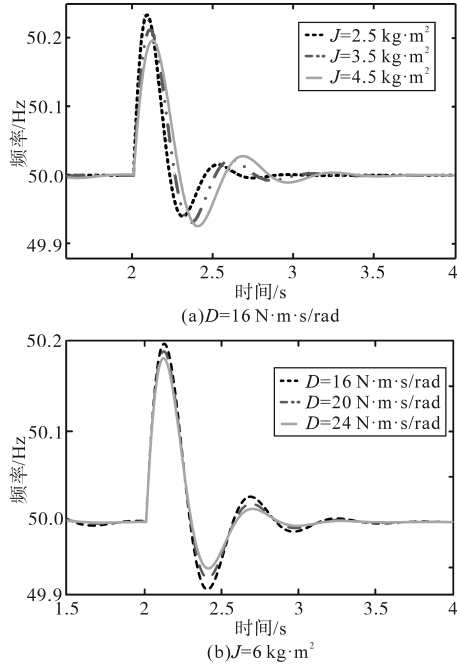


图4 变转动惯量/阻尼下的频率动态响应

Fig.4 Grid frequency signature during modulation of system inertia and damping

1.3 分数阶控制原理

分数阶惯性环节传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{Js^\lambda + D} \quad (14)$$

其中, $\lambda \in R^+$ 为分数阶数(fractional-order),表征微分/积分运算的非整数阶特性。

分数阶惯性环节频域特性如下:

$$G(j\omega) = \frac{1}{J(j\omega)^\lambda + D} \quad (15)$$

在保持转动惯量 J 与阻尼系数 D 恒定的条件下,通过调节分数阶控制器分数阶数 λ ,研究其对系统频域响应特性的影响,相应 Bode 图如图 5 所示。

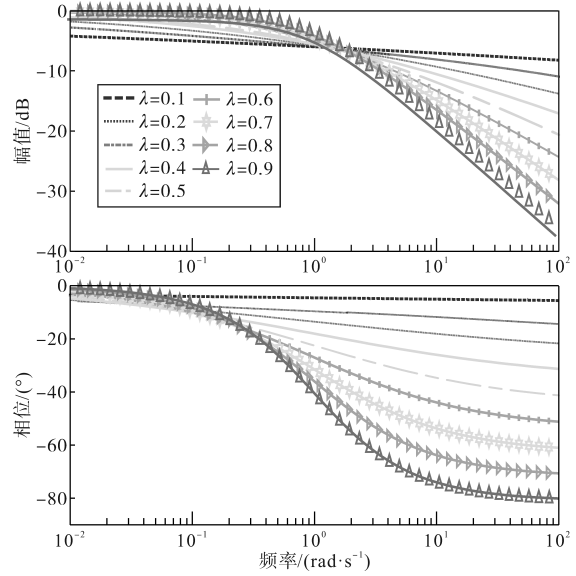


图5 分数阶虚拟惯性的Bode图

Fig.5 Bode diagram of fractional-order virtual inertia

基于频域响应特性分析,当 $\lambda=1$ 时,其控制策略退化为传统整数阶VSG模型;当 λ 进入次整数阶域($\lambda < 1$)时,随着 λ 值从1.0向0.1递减,幅频特性曲线的渐近线斜率逐渐减小,所以分数阶虚拟惯性环节较传统整数阶模型展现出更优的暂态稳定性与动态跟踪性能。进一步结合相频特性分析可知,相较于整数阶模型,分数阶虚拟惯性在关键频段内形成更高的相位裕度,其相位滞后量的显著缩减直接优化了动态相位误差抑制能力,从而全面提升系统在暂态过程中的同步稳定性。

2 AC-FO-VSG控制策略

传统VSG控制通过虚拟惯性模拟同步发电机的外特性,但在动态调节过程中暴露显著缺陷:其固定参数机制会激发功率振荡与频率超调现象。本文在传统VSG的转子运动方程中引入

分数阶惯量项 $1/Js^A$, 结合频率偏差 $\Delta\omega$ 及其变化率 $d\omega/dt$ 的自适应反馈, 动态生成惯量 J 与阻尼系数 D 并实时回馈至机械方程, 通过分数阶控制与参数自适应机制的协同作用, 提升系统动态响应与频率稳定性, 本文所提 AC-FO-VSG (adaptive control-fractional-order-virtual synchronous generator) 控制器如图6所示。

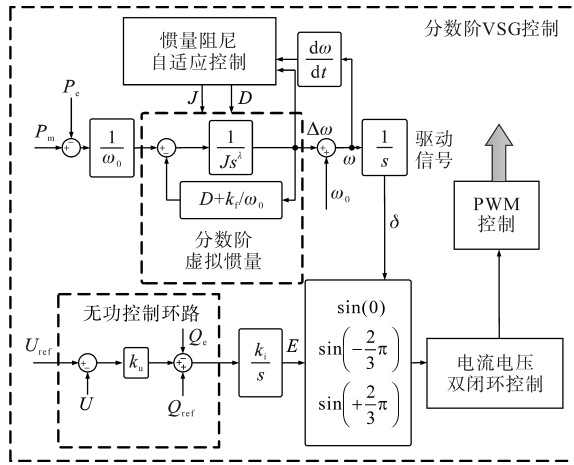


图6 AC-FO-VSG控制器框图

Fig.6 Block diagram of AC-FO-VSG controller

2.1 自适应控制策略

传统的同步发电机的控制参数会受到物理约束(如转动惯量由转子质量决定、阻尼系数受机械结构限制), 而VSG的控制参数则不受机械系统固有特性的物理约束, 其虚拟惯量 J 和阻尼系数 D 可通过控制算法灵活配置。传统VSG控制策略依赖固定转动惯量 J 与阻尼系数 D , 难以适应源-荷随机波动导致的宽工况运行需求。本文引入自适应控制算法如下式:

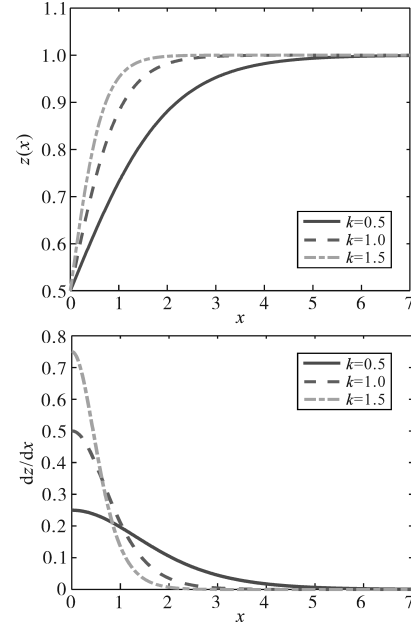
$$J = \begin{cases} (2J_0 - J_{\max}) + 2(J_{\max} - J_0) \frac{e^{k_1|d\omega/dt|}}{e^{k_1|d\omega/dt|} + e^{-k_1|d\omega/dt|}} & \Delta\omega(d\omega/dt) > 0 \cap |d\omega/dt| > T_j \\ J_0 & |d\omega/dt| \leq T_j \\ J_0 & \Delta\omega(d\omega/dt) < 0 \cap |d\omega/dt| > T_j \end{cases} \quad (16)$$

$$D = \begin{cases} (2D_0 - D_{\max}) + 2(D_{\max} - D_0) \frac{e^{k_2|\Delta\omega|}}{e^{k_2|\Delta\omega|} + e^{-k_2|\Delta\omega|}} & |\Delta\omega| > T_d \\ D_0 & |\Delta\omega| \leq T_d \end{cases} \quad (17)$$

式中: J_0 为VSG稳定运行时的转动惯量; D_0 为VSG稳定运行时的阻尼系数; $J_{\max}$ 为转动惯量的最大允许值; $D_{\max}$ 为阻尼系数的最大允许值; T_j, T_d

为设定的变化阈值; k_1, k_2 分别为惯量和阻尼的调节系数。

本文在传统VSG自适应控制上改进, 用 $z(x) = e^{kx}/(e^{kx} + e^{-kx})$ 函数来优化控制参数。如图7所示, $z(x)$ 函数特性为: $0.5 < z(x) < 1, x \in [0, +\infty]$ 。引入 $z(x)$ 函数可以将转动惯量和阻尼系数固定在 J_0 和 $J_{\max}, D_0$ 和 $D_{\max}$ 之间变化, 另外可以通过调节函数中 k 的值来控制惯量和阻尼参数的变化速度, 避免参数变化速度过大或过快。

图7 $z(x)$ 函数和 $z(x)$ 导数图像Fig.7 Graphs of the function $z(x)$ and its derivative

2.2 分数阶控制策略

传统VSG控制通过引入虚拟惯量模拟同步机转子动力学特性, 但在电网扰动工况下, 其固定参数机制将激发有功-频率耦合振荡与功率幅值越限现象, 同时延缓动态响应过程, 显著削弱系统暂态稳定性。为此采用分数阶控制来降低系统阶数, 抑制动态振荡、功率超调, 同时提高系统响应速度。分数阶虚拟同步机控制策略是将VSG有功控制环路中的虚拟惯性环节替换成分数阶虚拟惯性环节, 其中分数阶控制有功环路如图8所示。

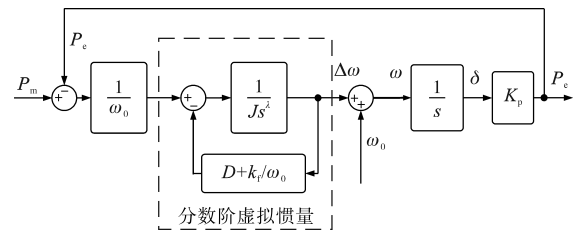


图8 分数阶控制有功环路

Fig.8 Fractional-order active power control loop

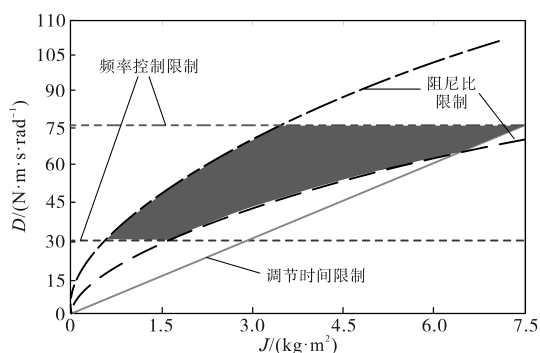


图10 转动惯量和阻尼系数的取值范围

Fig.10 Range of inertia and damping coefficient

波动,设置AC-FO-VSG系统的控制阶数不高于二阶,用于削弱二阶系统的动态振荡^[14]。设定 λ 的范围为 $0 < \lambda < 1$,本文分数阶数按实际需求进行选择,最终选用 $\lambda = 0.6$ 阶进行折中参数设置。

Oustaloup滤波器拟合阶数不能选太大,防止仿真时间过长,也不能选的太小,拟合阶数过小会导致拟合精度不足,综合考虑仿真精度和时间的要求,选取滤波器拟合阶数 $N=5$ 。根据VSG机械振荡主频段,选取 $\omega_h=62.8$ rad/s, $\omega_b=0.63$ rad/s,防止发生振荡。

3 仿真结果及分析

基于Matlab/Simulink环境建立图6所示的AC-FO-VSG完整仿真模型,并且为了验证本文提出自适应控制的分数阶虚拟同步机控制的动态性能的优越性,本次仿真模型将引入另外两种控制策略进行比较,分别是有功微分反馈型虚拟同步机(active-power differential feedback VSG, ADFB-VSG)控制策略与有功微分前馈型虚拟同步机(active-power differential feedforward VSG, ADFB-VSG)控制策略^[17-18],ADFB-VSG和ADFF-VSG有功闭环控制环路如图11所示。VSG主要系统参数和控制参数如表1所示。

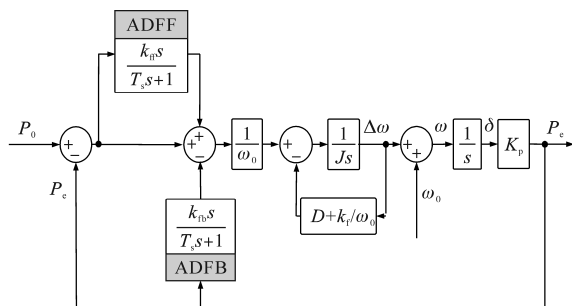


图11 ADFB-VSG和ADFF-VSG有功闭环控制环路

Fig.11 Power-loop topologies for ADFB & ADFB-VSG virtual synchronous generators

表1 VSG主要系统参数和控制参数

Tab.1 Main system and control parameters of virtual synchronous generator (VSG)

参数类型	参数	数值	参数	数值
主电路参数	滤波电容/ μF	20	滤波电感/ mH	4
	额定线电压/ V	380	直流母线电压/ V	1 500
	额定频率/ Hz	50	额定功率/ kW	150
控制参数	$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3	$D_0/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	52
	$J_{\max}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	7.5	$D_{\max}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	76.06
	k_1	1	k_2	0.5
	k_{ff}	0.12	k_{fb}	0.12
	$\omega_h/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	62.8	$\omega_b/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	0.63

3.1 AC-FO-VSG控制下分数阶数对功率和频率波动的影响

仿真工况1设置如下:仿真时长为4 s,开始时刻,混合储能VSG输出功率为150 kW,无功功率设定为0,电网频率保持50 Hz不变;在2 s时,混合储能VSG输出功率从150 kW阶跃上升至180 kW,对比分析不同工况下系统频率偏差与有功功率输出的动态响应特性,验证所提分数阶VSG(FO-VSG)策略在功率突变场景中抑制频率波动与功率超调的有效性。图12为仿真工况1下的混合储能VSG输出功率变化曲线。

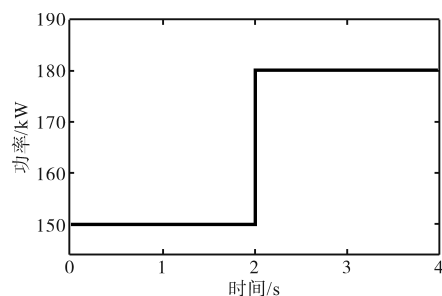


图12 仿真工况1:混合储能VSG输出功率变化曲线

Fig.12 Case 1: output power variation curve of hybrid energy storage-based VSG

图13是AC-FO-VSG控制下分数阶不同阶数对有功功率的影响,分别让分数阶数 λ 取值{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0},当 λ 取1.0阶时,有功功率的超调量高达2.36%,稳态时间为0.736 s;当 λ 取0.8阶时,有功功率的超调量优化为0.40%,稳态时间为0.623 s;当 λ 分别降低至0.6, 0.4, 0.2阶时,有功功率的超调量都仅为0.21%,稳态时间分别为0.58 s, 0.63 s, 0.65 s;有功功率超调量随着引入分数阶控制得到了明显的降低,但是随着分数阶数的继续降低至0.6阶及以下,有功功率波动抑制的能力非常有限,有功功率超调量达到0.21%后基本不会发生大幅改善,但是有功功率进入稳态

的时间反而会被拉长。综上,本文选用超调量进一步降低空间有限、稳态进入时间较短的0.6阶进行折中参数设置。

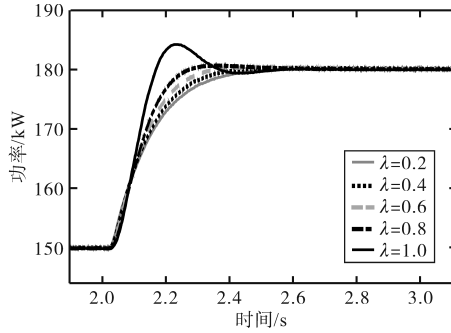


图13 AC-FO-VSG控制下分数阶不同阶数对有功功率的影响
Fig.13 Effect of fractional-order control on active power under AC-FO-VSG

为深入探究分数阶数对系统动态响应的作用机制,图14展示了AC-FO-VSG控制中不同 λ 值(0.2/0.4/0.6/0.8/1.0)对频率特性的影响规律,实验数据显示,当 λ 取值{0.2,0.4,0.6,0.8,1.0}时,对应频率超调量分别为0.177 Hz,0.177 Hz,0.178 Hz,0.189 Hz,0.240 Hz。随着分数阶数减小,频率超调量呈递减趋势,证实分数阶控制在抑制频率波动方面显著优于整数阶策略。但当 $\lambda \leq 0.6$ 时,波动抑制效果的提升幅度趋缓。

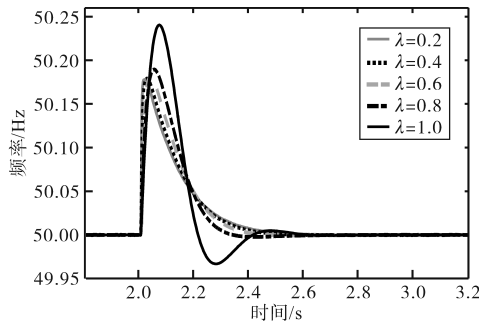


图14 AC-FO-VSG架构中分数阶数对频率动态特性的调控规律
Fig.14 Regulatory mechanisms of fractional-order λ on frequency dynamics in AC-FO-VSG

结合上述分数阶数对有功功率的影响分析, λ 为0.6阶时有功功率进入稳态时间较短且超调量也较小,且在分数阶数对系统频率的影响中, λ 为0.6阶时系统频率超调量也相对较小。综合权衡有功动态调节特性与频率暂态响应性能,本研究基于功频协调最优性准则,最终确定采用分数阶数 $\lambda=0.6$ 完成参数配置。

3.2 不同控制策略下的有功功率扰动实验

仿真工况2设置如下:仿真时长为6 s,开始时,混合储能VSG出力为150 kW,无功功率设定为0,电网频率保持50 Hz不变;2 s时,混合储能

VSG出力从150 kW阶跃上升至180 kW。图15为仿真工况2下的混合储能VSG输出功率变化曲线。

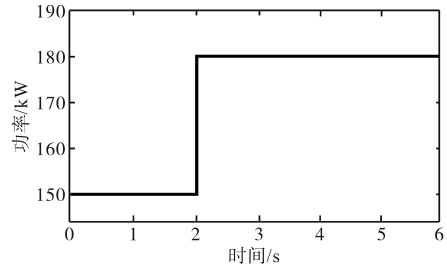


图15 仿真工况2:混合储能VSG输出功率变化曲线
Fig.15 Case 2:output power variation curve of hybrid energy storage-based VSG

图16展示了工况2下的有功功率和频率响应曲线,其控制策略对比涵盖传统VSG、分数阶VSG(FO-VSG)、有功微分前馈型虚拟同步机(ADFF-VSG)、有功微分反馈型虚拟同步机(ADFB-VSG)和自适应分数阶VSG(AC-FO-VSG)。

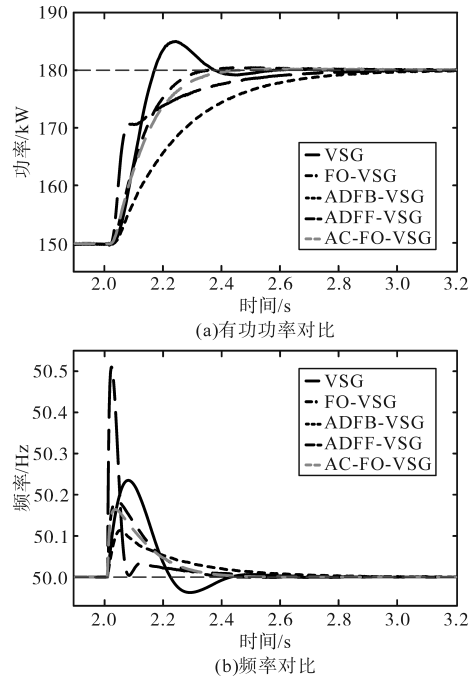


图16 不同控制策略下的有功功率和频率对比
Fig.16 Comparative analysis of active power and frequency dynamics under different control strategies

采用传统VSG控制策略时,有功功率的超调量高达2.76%,进入稳态需要0.94 s,同时系统频率超调量为0.235 Hz,且需要0.95 s才能达到稳态;采用ADFB-VSG控制策略,有功功率超调量低至0.191%,且需要1.25 s才能达到稳定状态,系统频率最大偏差和进入稳态时间为0.113 Hz和1.26 s,该控制策略有功功率超调量和系统频率最大偏差都较小,但是有功功率和系统频率进入

稳态时间最长,响应速度最慢;采用ADFF-VSG控制策略,有功功率超调量为0.218%,且需要1.22 s达到稳定状态,系统频率最大偏差0.51 Hz,且需要1.24 s达到稳定状态,该控制策略有功功率超调量较小,但是系统频率最大偏差却很高,有功功率和系统频率进入稳态时间较长,响应速度较慢;FO-VSG控制策略使有功功率超调量和稳态时间分别降至0.697%和0.78 s,系统频率最大偏差和进入稳态时间同步降至0.185 Hz和0.80 s,分数阶虚拟惯量通过提升开环频域稳定性,增强扰动抑制与动态调节能力,显著改善系统响应性能;采用AC-FO-VSG控制策略后,有功功率超调量和进入稳态时间进一步降低至0.168%和0.58 s,系统频率最大偏差和进入稳态时间也进一步降低为0.174 Hz和0.59 s,该控制策略基于FO-VSG动态调整惯量和阻尼,实时匹配系统工况,显著提升了抗扰恢复速度,平衡了动态与稳态性能。经过上述控制策略功率和系统频率响应综合对比,结果表明AC-FO-VSG控制策略相较于其它控制策略具有更加优越的动态性能。

3.3 不同控制策略下的电网频率扰动实验

仿真工况3设置如下:仿真时长为4 s,开始时,混合储能VSG出力为150 kW,无功功率设定为0,电网频率保持50 Hz不变;2 s时电网频率从50 Hz阶跃降至49.9 Hz。图17为仿真工况3下系统频率变化曲线。

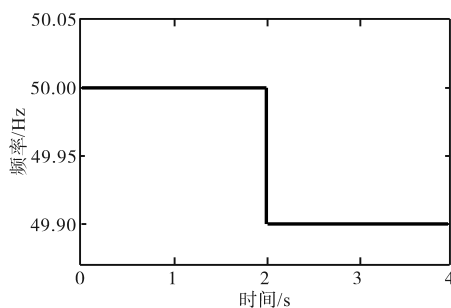


图17 仿真工况3:系统频率变化曲线

Fig.17 Case 3: system frequency variation curve

本次仿真实验分别采用传统VSG,FO-VSG,ADFB-VSG,ADFF-VSG和AC-FO-VSG控制策略,在仿真工况3下的系统频率响应曲线如图18所示。从图中可以明显看出,传统VSG控制和FO-VSG控制中,系统最大频率对比频率指令49.9 Hz虚线,有较为明显的差值,分别为0.013 9 Hz和0.007 1 Hz,而AC-FO-VSG控制策略的最大频率偏差相比较传统VSG控制和FO-VSG控制降低了

83.5%和67.7%,进入稳态的时间也得到了明显降低,AC-FO-VSG控制对比ADFB-VSG,ADFF-VSG控制,AC-FO-VSG控制在进入稳态时间上具有更加明显的优势,进入稳态时间较短,分别是ADFB-VSG,ADFF-VSG控制进入稳态时间的42.9%和43.8%。

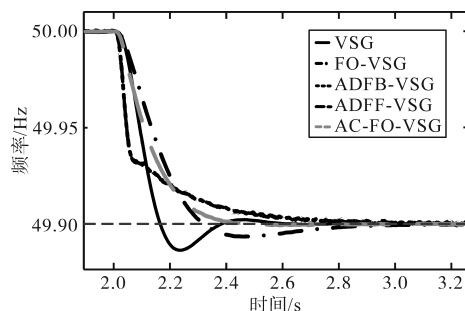


图18 不同控制策略下的系统频率对比

Fig.18 Frequency comparison under different control strategies

值得一提的是,本次ADFB-VSG,ADFF-VSG控制选用参数 k_{ff} 和 k_b 都取0.12,在这一特定条件下频率响应曲线重合,反映了控制策略在稳态与参数匹配时的等效性,本文尚未研究取参数不同时与AC-FO-VSG的动态响应对比。

4 结论

传统虚拟同步机(VSG)通过固定虚拟惯量与阻尼系数增强逆变器频率/电压支撑能力,但牺牲了系统灵活性,引发高阶动态特性导致的功率振荡与频率超调等暂态失稳现象。基于上述问题,本文构建自适应分数阶VSG(AC-FO-VSG)控制体系,并得出结论如下:

1)所提自适应控制策略基于FO-VSG控制动态调整惯量和阻尼,实时匹配系统工况,增加了FO-VSG控制参数的自由度。

2)在传统VSG的基础上引入分数阶控制,通过调节分数阶数来优化开环频域特性,从而有效抑制有功功率振荡与频率暂态超调,显著提升系统在动态过渡过程中的抗扰动能力。

3)所提AC-FO-VSG控制策略将自适应控制与分数阶控制相结合,在简化参数整定的同时优化控制架构,相较于传统VSG控制与基础分数阶VSG控制,增加了系统控制参数自由度,有效抑制了功率振荡与频率超调,加速动态响应,平衡动态性能,协调动态-稳态性能冲突,增强并网稳定性。

4)通过仿真分析,所提AC-FO-VSG控制策略

相较于ADFF-VSG和ADFB-VSG控制拥有更好的动态性能,在系统有功功率扰动下频率最大偏差和在系统的频率扰动下进入稳态时间中都有较为明显的改善。

参考文献

- [1] 刘欣,郭志博,贾焦心,等.基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J].电工技术学报,2023,38(15):4130-4146.
Liu Xin, Guo Zhibo, Jia Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146.
- [2] Wang W K, Yao W X, Chen C, et al. Fast and accurate frequency response estimation for large power system disturbances using second derivative of frequency data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2483-2486.
- [3] Fang H W, Yu Z W. Control of virtual synchronous generator for frequency regulation using a coordinated self-adaptive method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(1): 175-184.
- [4] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Zhong Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [5] 李军,胡传意.基于改进型虚拟同步发电机的功率控制[J].电测与仪表,2019,56(3):133-138.
Li Jun, Hu Chuanyi. Power control based on improved virtual synchronous generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 133-138.
- [6] 杜威,姜齐荣,陈蛟瑞.微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):26-31,36.
Du Wei, Jiang Qirong, Chen Jiaorui. Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31, 36.
- [7] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [8] Wang F, Zhang L J, Feng X Y, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5124-5133.
- [9] Shi R L, Zhang X, Hu C, et al. Self-tuning virtual synchronous generator control for improving frequency stability in autonomous photovoltaic-diesel microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 482-494.
- [10] Li D D, Zhu Q W, Lin S F, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [11] Li M Y, Huang W T, Tai N L, et al. A dual-adaptivity inertia control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 594-604.
- [12] Shi R, Lan C, Dong Z, et al. An active power dynamic oscillation damping method for the grid-forming virtual synchronous generator based on energy reshaping mechanism[J]. Energies, 2023, 16(23): 7723.
- [13] 薛定宇.分数阶微积分学与分数阶控制[M].北京:科学出版社,2018.
Xue Dingyu. Fractional calculus and fractional order control [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [14] 石荣亮,杨桂华,王国斌,等.基于有功分数阶微分校正的储能VSG并网有功响应策略[J].电力自动化设备,2024,44(2):204-210.
Shi Rongliang, Yang Guihua, Wang Guobin, et al. Grid-connected active power response strategy of energy storage VSG based on active power fractional differential correction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 204-210.
- [15] 张赞宁,周小萌.并网逆变器分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制技术[J].控制与决策,2021,36(2):463-468.
Zhang Yunying, Zhou Xiaomeng. Virtual synchronous generator control technology with fractional virtual inertia for grid connected inverters[J]. Control and Decision, 2021, 36(2): 463-468.
- [16] Long B, Li X Y, Rodriguez J, et al. Frequency stability enhancement of an islanded microgrid: A fractional-order virtual synchronous generator[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 147(2): 108896.
- [17] 兰征,龙阳,曾进辉,等.引入暂态电磁功率补偿的VSG控制策略[J].电网技术,2022,46(4):1421-1429.
Lan Zheng, Long Yang, Zeng Jinhui, et al. VSG control strategy with transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1421-1429.
- [18] 兰征,龙阳,曾进辉,等.考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J].电力系统自动化,2022,46(11):131-141.
Lan Zheng, Long Yang, Zeng Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.

收稿日期:2025-06-26

修改稿日期:2025-07-17