

控制与决策

Control and Decision

并网逆变器分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制技术

张贇宁, 周小萌

引用本文:

张宁, 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0391>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种反向递推正弦干扰观测器的设计方法](#)

Design method of reverse recursive sinusoidal disturbance observer

控制与决策. 2021, 36(2): 403–410 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0769>

[基于强化学习的倒立摆分数阶梯度下降RBF控制](#)

Reinforcement learning based fractional gradient descent RBF neural network control of inverted pendulum

控制与决策. 2021, 36(1): 125–134 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0816>

[基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究](#)

Tracking control for four-wheel vehicle semi-physical simulation based on back-stepping method

控制与决策. 2021, 36(1): 90–96 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0471>

[脉冲控制下多智能体系统的保性能双向编队控制](#)

Guaranteed cost bipartite formation problem of multi-agent systems with impulse control

控制与决策. 2021, 36(1): 180–186 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0854>

[十字形二维稀疏混合MIMO相控阵雷达收发阵列设计](#)

Joint design of transceiver array for cross-shaped two-dimensional sparse hybrid MIMO phased array radar

控制与决策. 2020, 35(12): 2875–2882 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0221>

并网逆变器分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制技术

张贇宁^{1,2†}, 周小萌¹

(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: 传统虚拟同步发电机(VSG)控制策略在逆变器并网运行中为其提供了虚拟阻尼与惯性,增加了系统的频率和电压的支撑能力. 然而,引入的虚拟惯性会增加系统的阶数,引起逆变器并网运行过程中输出有功功率的振荡,并且虚拟惯性与阻尼会使系统的响应速度变慢. 对此,基于分数阶虚拟惯性环节的频域特性分析,提出一种分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制策略. 与基于一阶惯性环节的VSG技术相比,基于分数阶虚拟惯性的VSG技术增加了可调参数,能显著抑制有功功率的振荡,全面改善并网逆变器的性能. 仿真结果验证了所提出控制策略的可行性和优越性.

关键词: 虚拟同步发电机; 虚拟惯性; 分数阶微积分; 逆变器

中图分类号: TP13

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0391

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 张贇宁,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.

Virtual synchronous generator control technology with fractional virtual inertia for grid-connected inverters

ZHANG Yun-ning^{1,2†}, ZHOU Xiao-meng¹

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

Abstract: The traditional virtual synchronous generator (VSG) control strategy provides virtual damping and inertia in the grid-connected operation of the inverter, which increases the frequency and voltage support capability of the system. However, the introduced virtual inertia increases the order of the system, which will cause the output of the active power to oscillate during the grid-connected operation of the inverter; the introduced virtual inertia and damping make the response speed of the system slower. Based on the analysis of frequency domain characteristics of fractional virtual inertia link, a virtual synchronous generator control method with fractional virtual inertia is proposed. Compared with the traditional VSG technology based on the first order inertia element, the VSG control with fractional virtual inertia increases the adjustable parameters, significantly suppresses the oscillation of the active power, and improves the performance of the grid-connected inverters. Simulation results verify the feasibility and superiority of the proposed control strategy.

Keywords: virtual synchronous generator; virtual inertia; fractional calculus; inverter

0 引言

由于环境污染问题,分布式能源得到了大力发展,已有越来越多的分布式电源通过逆变器接入电网. 然而,电力电子逆变器缺乏惯性,其快速响应的特性在小扰动情况下易使系统失去稳定^[1].

并网逆变器有很多经典的控制策略,其中下垂控制得到了广泛运用. 下垂控制原理是模拟同步发电

机的一次调频特性. 当并联运行的逆变器采用此控制策略时,可以通过不同的下垂特性合理地分配各自承担负荷的大小,且这种分配方式中不需要彼此间的相互通信. 但是,由于无惯性和阻尼的特点,下垂控制缺乏对系统频率和电压的支撑能力.

同步发电机具有大惯性、高输出阻抗等特点^[2],在电力系统发生小扰动时,能够为系统提供足够的

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61603212).

责任编委: 张国山.

†通讯作者. E-mail: yunningzhang@gmail.com.

时间来调节功率,使系统不容易失去稳定.为了提高电网系统在分布式电源高渗透率情况下的稳定性,学者们提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的控制思想^[3-5].虽然实现的思路不同,但是,VSG技术通过模拟同步发电机的特性,可使电力电子变换器呈现同步发电机的外特性,配合储能系统,可使系统具备虚拟阻尼和惯性,从而改善系统的稳定性^[6-7].

然而,VSG技术引入的虚拟惯性增加了系统的阶数,使逆变器并网运行时输出的有功功率易出现振荡.一方面,VSG的瞬时抗扰和过载能力较差,较长时间的功率振荡引起的电流冲击会触发并网逆变器保护停机;另一方面,虚拟惯性和阻尼的引入也使系统的响应速度变慢^[8].文献[9-13]针对功率振荡或频率稳定的问题提出了基于自适应虚拟惯性或阻尼的同步发电机控制策略,这些方法通过模拟同步发电机的行为,构造频率或功率变化率与虚拟惯性的关系,自适应改变VSG控制的惯性或阻尼参数,从而提高微电网系统抗干扰能力和过载能力.上述文献都是通过改变惯性参数或阻尼参数来改善系统的性能,却忽略了逆变器并网运行时,输出有功功率的动态性能、稳态性能与参数调节存在矛盾的问题^[14].

由于分数阶控制器的优越性,越来越多的分数阶控制器运用到电力电子技术,使得电力电子的控制性能更好^[15].1999年,Igor Podlubny提出了分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器,近几年,分数阶控制器在很多领域取得了成功.文献[16]提出了永磁同步发电机分数阶微积分控制方法;文献[17]基于理想Bode传递函数设计了分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器,并运用到直流电机调速控制系统中,能够达到期望的响应性能,系统具有强鲁棒性;文献[18]将模糊控制与分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 相结合,提出一种模糊分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器,提高了控制系统的实时性和抗干扰性,且能够改善系统的稳态性;文献[19]针对并网光伏逆变器设计了最优无源分数阶PID(PFOPID),并对PFOPID控制与常规PID控制、FOPID控制和无源控制(passivity-based control, PBC)进行了比较,指出PFOPID能在各类工况下实现最大功率追踪,并具有较好的动态特性.

针对当前VSG控制策略中参数整定存在的耦合问题,结合对分数阶虚拟惯性环节的频域特性分析,本文提出一种分数阶虚拟惯性虚拟同步发电机技术,对并网逆变器分数阶虚拟惯性VSG控制策略与一阶虚拟惯性VSG控制策略的开环Bode图进行对比分析,并通过仿真验证了分数阶虚拟惯性VSG控制策

略的可行性和优越性.

1 三相VSG电路拓扑及控制结构

本文采用电压源型虚拟同步发电机控制结构,VSG电路拓扑及控制结构如图1所示.通过区域①的给定有功功率与无功功率参考值及额定角频率,有功-频率、积分环节及无功-电压控制环节输出相位角和电压参考值,再通过区域②的旋转坐标变换,及区域③的电压内环控制,最后经过区域④的PWM发生器产生脉冲来控制逆变器开关的通断,从而改变输出有功功率.图1中: L_f 、 r_{L_f} 、 C_f 分别为逆变器滤波电感、电阻、电容; L_l 为电网电感, r_l 为电网电阻; $i_{L_{fa}}$ 、 $i_{L_{fb}}$ 、 $i_{L_{fc}}$ 为逆变器桥臂电流; u_{0a} 、 u_{0b} 、 u_{0c} 为逆变器输出电压; u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为电网电压.当KM断开时,逆变器孤岛运行;KM闭合时,逆变器并网运行.

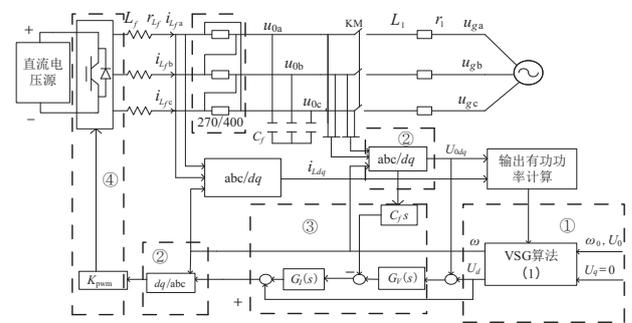


图1 VSG并网电路拓扑及控制结构框图^[14]

VSG电压内环采用输出电压-电容电流双闭环控制,用于跟踪VSG控制器输出的电压指令,并采用 dq 坐标系下的PI调节器 $G_V(s)$;电容电流反馈控制用于改善电压动态性能,采用 dq 坐标系下的比例调节器 $G_I(s)$ ^[20].

根据牛顿运动定律,并模拟同步发电机转子运动方程,VSG调速器、无功-电压下垂方程^[21-22]为

$$\begin{cases} P_m - P_{\text{out}} = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} + D(\omega - \omega_0), \\ P_m = P_0 + K_m(\omega_0 - \omega), \\ U_d = U_0 - K_U(Q_{\text{out}} - Q_0). \end{cases} \quad (1)$$

其中: J 为虚拟转动惯量, D 为虚拟阻尼系数, ω_0 为额定电压角频率, ω 为VSG输出电压角频率, P_m 为VSG虚拟机械功率, P_{out} 为VSG输出有功功率, K_m 为虚拟调速器调节系数, K_U 为无功下垂系数, U_0 为输出电压额定幅值, U_d 为输出电压幅值指令, Q_0 为 U_0 对应的无功功率, Q_{out} 为VSG输出无功功率.

图2为VSG并网等效电路.其中: U_g 为电网电压幅值; U_d 为VSG输出端电压; δ 为两者之间的相位差; Z 为逆变器等效输出阻抗、变压器漏感及线路阻抗之和,一般呈感性^[8].

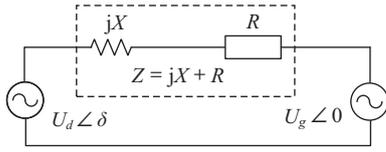


图2 VSG并网等效电路

稳态时, δ 一般很小, $\sin \delta \approx \delta$, 根据 VSG 并网等效电路可求出输出功率为

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = \frac{3U_d U_g \sin \delta}{X} \approx \frac{3U_d U_g}{X} \delta, \\ Q_{\text{out}} = \frac{3U_d \cos \delta - U_g}{X} U_g \approx \frac{3U_d - U_g}{X} U_g. \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)可得并网逆变器 VSG 控制器输出有功功率的闭环传递函数表达式为

$$P_{\text{out}} = \frac{K_P}{J\omega_0 s^2 + (K_m + D)s + K_P} P_0 + \frac{K_P(J\omega_0 s + K_m + D)}{J\omega_0 s^2 + (K_m + D)s + K_P} (\omega_0 - \omega_g), \quad (3)$$

其中 $K_P = 3U_d U_g / X$.

由式(3)可得逆变器并网运行时稳态输出有功功率为

$$P_{\text{outs}} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{K_P}{J\omega_0 s^2 + (K_m + D)s + K_P} P_0 + \frac{K_P(J\omega_0 s + K_m + D)}{J\omega_0 s^2 + (K_m + D)s + K_P} (\omega_0 - \omega_g) \right) = P_0 + (K_m + D)(\omega_0 - \omega_g). \quad (4)$$

由式(4)可知 K_m 和 D 与输出功率的稳态误差有关, 一般规定稳态下 $\Delta\omega_{\text{max}} = S_{\text{rate}} / (K_m + D) \leq 1\% \omega_0$, S_{rate} 为 VSG 额定容量. K_m 和 D 的作用相同, 考虑各变量的物理意义, 文中取 $K_m = S_{\text{rate}} / (1\% \omega_0)$, $D \geq 0$ ^[23]. 因 K_m 与 D 的效果相同, K_m 为已知参数, 故有功功率的稳态性能只与阻尼系数 D 有关, 且阻尼系数 D 越大, 有功功率稳态误差越大.

根据式(3)可得输出有功功率小信号闭环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{\Delta P_{\text{out}}}{\Delta P_0} = \frac{K_P}{J\omega_0 s^2 + (K_m + D)s + K_P}. \quad (5)$$

当 $J = 2, 6, 15$ 时, $D \in [0, K_m]$, 根据式(5)可得零极点的分布图, 如图3所示.

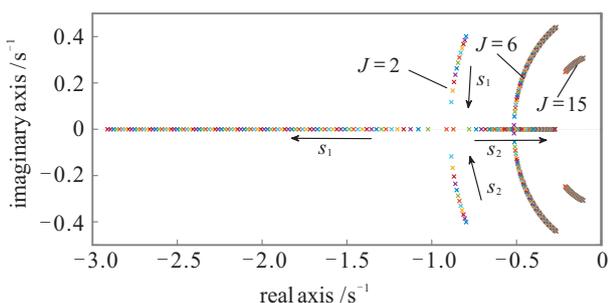


图3 VSG控制闭环零极点分布图

由图3可知其惯性系数 J 越大, 极点 s_1, s_2 越靠近虚轴, 系统的稳定性会变差. 阻尼系数 D 越大(图中箭头方向为 D 值增大的方向), 极点 s_1, s_2 越靠近实轴, 系统由欠阻尼变为过阻尼, 系统超调量减少, 响应速度变慢.

由式(4)分析得出的稳态误差与参数 D 的关系以及图3零极点分布图分析得到的动态性能与参数 J 和 D 的关系可知: 当 D 越大时, 输出有功功率稳态误差越大; 当 J 越大, D 较小时, 系统稳定性差, 超调量也大; D 越大, 超调量越小, 但响应速度较慢. 因此, 虚拟同步发电机控制策略中的参数选择在动态性能和稳态性能调节中存在矛盾.

2 分数阶虚拟惯性环节

对于一般的分数阶惯性环节, 其传递函数为

$$C(s) = \frac{1}{J s^\lambda + D}, \quad (6)$$

其中 J 和 D 分别为分数阶惯性环节虚拟惯量系数和虚拟阻尼系数.

分数阶惯性环节频域特性可以表示为

$$C(j\omega) = \frac{1}{J(j\omega)^\lambda + D}. \quad (7)$$

固定 J, D 取值, 改变分数阶阶次(改变 λ 的取值), 相对应的 Bode 图如图4所示(这里取 $J = 1, D = 1$).

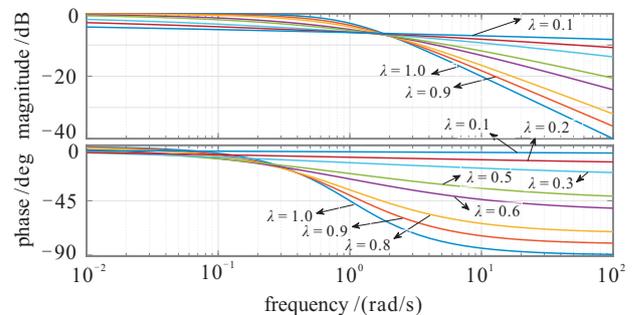


图4 阶次变化时分数阶虚拟惯性的 Bode 图

当 $\lambda = 1$ 时, 分数阶虚拟惯性环节简化为一阶惯性环节. 由图4可知, 当 $\lambda < 1$ 时, 分数阶虚拟惯性对应的幅频特性曲线比一阶虚拟惯性的斜率小, 所以分数阶虚拟惯性环节具有更好的稳定性与快速性. 从相频特性可以看到, 分数阶虚拟惯性比整数阶虚拟惯性环节的稳态裕度更大, 系统稳定性更好^[15, 17, 24].

3 分数阶虚拟惯性 VSG 控制策略

基于以上对分数阶虚拟惯性 Bode 图的分析可知, 分数阶虚拟惯性环节比整数阶虚拟惯性环节具有更好的性能指标. 为了改善传统 VSG 控制系统的动态性能, 平抑动态过程中功率振荡, 本文提出一种分数阶虚拟惯性 VSG 控制策略, 如图5所示.

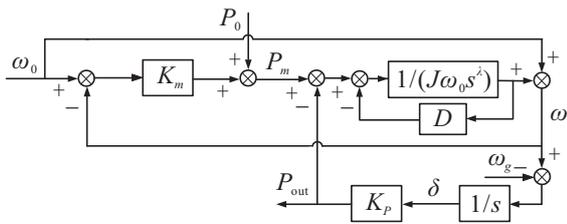


图5 并网逆变器分数阶虚拟惯性VSG控制框图

由图5可得分数阶虚拟惯性VSG并网输出有功功率的闭环传递函数为

$$P_{out} = \frac{K_P}{J\omega_0 s^{1+\lambda} + (K_m + D)s + K_P} P_0 + \frac{K_P(J\omega_0 s^\lambda + K_m + D)}{J\omega_0 s^{1+\lambda} + (K_m + D)s + K_P} (\omega_0 - \omega_g) \quad (8)$$

根据式(8),逆变器并网运行时分数阶虚拟惯性VSG控制稳态输出有功功率为

$$P_{outs} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{K_P}{J\omega_0 s^{1+\lambda} + (K_m + D)s + K_P} P_0 + \frac{K_P(J\omega_0 s^\lambda + K_m + D)}{J\omega_0 s^{1+\lambda} + (K_m + D)s + K_P} (\omega_0 - \omega_g) \right) = P_0 + (K_m + D)(\omega_0 - \omega_g) \quad (9)$$

由式(9)可知,逆变器并网VSG控制输出的有功功率稳态输出也只与D相关,且D越小,稳态误差越小。

根据式(8)可得输出有功功率小信号闭环传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\Delta P_{out}}{\Delta P_0} = \frac{K_P}{J\omega_0 s^{1+\lambda} + (K_m + D)s + K_P} \quad (10)$$

由式(10)和(5)可知,为使系统具有一定稳定裕度,且由文献[8]可知,传统VSG控制策略虚拟惯性的引入,会增加系统的阶数,导致系统响应速度变慢、功率振荡等问题,因此在设计时,应使系统阶数不高于二阶系统,本文限定λ的范围为0 < λ < 1。

固定J、D取值,改变分数阶阶次(改变λ的取值,取J = 6、D = 0),根据式(10)得到图6所示的分数阶虚拟惯性VSG控制策略开环Bode图。

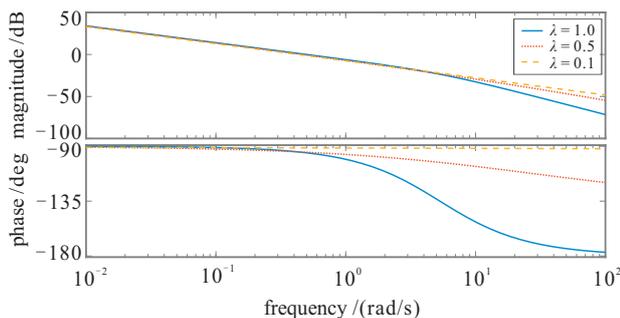


图6 分数阶虚拟惯性VSG控制策略与一阶虚拟惯性VSG控制策略的开环Bode图

分析图6开环Bode图可知,系统运用分数阶虚拟惯性VSG控制策略,使得开环系统中频段、高频段幅值衰减变慢变小,相位滞后减小。依据开环频率特性与闭环系统的动态性能的关系可知,闭环系统将有更小的超调量和上升时间,系统响应变快,动态性能与稳定性都能得到明显改善。

当λ = 1时,系统相当于传统一阶虚拟惯性VSG控制策略,在并网运行模式下,为典型的二阶的控制策略,如式(5)。

当λ ≠ 1,即0 < λ < 1时,为本文所提出的分数阶虚拟惯性VSG控制策略。式(9)所示分数阶虚拟惯性VSG控制策略有功功率的稳态性能与式(4)所示传统VSG控制策略相同,仍只由阻尼系数D决定,与分数阶阶数λ无关。引入可调参数λ,不仅降低了系统的阶数,减弱了有功功率的振荡,而且可以改变极点位置,增加动态性能控制自由度,使得参数D取得最小值,保持稳态性能最好;而通过调节λ来改善动态性能,从而解决参数D、J在动态性能与稳态性能调节中存在矛盾的问题。

在阻尼系数D的选择上,由式(4)可知,为使系统的有功功率稳态误差最小,D可取最小值0。

本文提出的分数阶虚拟惯性VSG控制策略,在微电网逆变器并网中,可通过阶数调节,加快系统的响应速度,改善系统的振荡,解决参数调节在动态性能与稳态性能存在矛盾的问题,使系统并网运行更加稳定。

4 仿真验证

为验证本文所提出控制策略的可行性与优越性,在Matlab/Simulink环境下搭建如图1所示的VSG并网电路及控制模型,电路及控制器的主要参数如表1所示。

表1 VSG并网参数

参数	大小	参数	大小
直流电压源 U_{dc}/V	600	变压器变比	270/400
额定频率 f/Hz	50	$C_f/\mu F$	60
L_f/mH	0.5	阻尼系数 D	0

仿真中,微电网在0.16s后开始并网运行,给定有功功率 P_0 初始为0kW;在0.17s时阶跃为50kW。利用仿真模型分析系统超调量随虚拟惯性J、超调量随分数阶虚拟惯性阶数λ变化而变化的情况,结果见表2(其中“-”表示超调量过大)。

由表2可知,当J一定时,系统的动态性能可以通过调节分数阶虚拟惯性阶数λ的取值来改善,从而验证了分数阶虚拟惯性VSG控制技术由于引入分数阶

表2 J与λ调节对应的系统超调量 %

虚拟惯量 J	阶数 λ					
	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9
2	24.15	13.96	20.16	19.54	15.13	86.63
6	13.93	14.80	151.20	35.22	141.95	140.60
8	15.77	28.30	29.12	28.82	—	40.88
10	13.73	14.66	18.33	15.08	30.28	79.46
15	23.29	55.90	64.17	14.20	140.91	121.61

阶数λ,增加了系统动态性能调节的灵活性. 另外,由表2可知,当J一定时,虽然调节λ可以改变超调量,但是,超调量与λ取值并不是严格单调的关系.

由文献[13]可知:一阶虚拟惯性VSG当虚拟惯性系数J太小时,系统不具备解耦条件,动态过程容易出现振荡;J越大,超调量越大. 结合表2,文献[14]以及传统同步发电机特征,本文折中选择J = 6.

在表2相同仿真条件下,给定J = 6,对一阶虚拟惯性VSG控制策略与分数阶虚拟惯性VSG控制策略的动态性能进行比较分析,并网逆变器输出有功功率动态响应如图7所示.

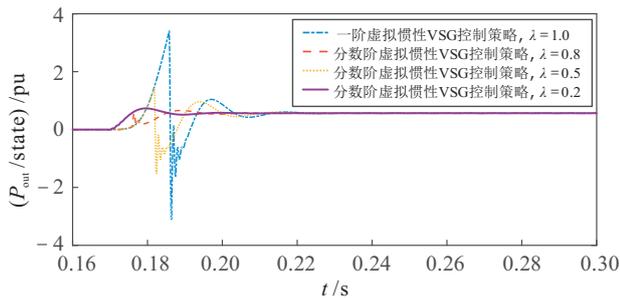


图7 有功功率阶跃响应波形对比

由图7可知:采用一阶虚拟惯性VSG控制策略的有功功率超调量最大,经过多次振荡后,在0.23s功率达到稳定;采用分数阶虚拟惯性VSG控制策略,当λ = 0.8时,有功功率超调量最小为28.20%,调节时间为0.2s,仍有明显的功率振荡现象;当λ = 0.2时,有功功率超调量变大为35.22%,调节时间变小为0.19s,且无明显功率振荡现象. 采用分数阶虚拟惯性VSG控制策略,输出有功功率动态性能随λ取值不同而变化,与整数阶虚拟惯性VSG控制策略相比,其超调量都有明显的减小,且响应速度变快. 综合分析系统的调节时间、振荡次数和超调量等动态响应指标,可以选取λ = 0.2作为分数阶虚拟惯性的阶次.

5 结论

虚拟惯性VSG控制策略引入的虚拟惯性,增加了系统的阶数,引起动态过程中的功率振荡;同时惯性的增加,也会出现系统响应速度变慢等问题. 本文

提出的分数阶虚拟惯性的VSG控制策略,可以在保持系统稳态性能的同时,通过引入的可调参数λ来改善逆变器并网运行下VSG控制策略输出有功功率的动态性能,解决参数变化在动态性能与稳态性能调节中存在矛盾的问题. 在微电网逆变器并网中,分数阶VSG控制策略能更好地改善系统的动态性能,使得系统更加稳定运行. 通过仿真验证了运用分数阶虚拟惯性VSG控制策略在并网运行中不仅能给系统提供惯性支撑,而且可以减弱系统有功功率的振荡,改善系统的动态性能.

参考文献(References)

- [1] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
(Wang C S, Li Y, Peng K. Summary of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation, 2012, 24(2): 12-20.)
- [2] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
(Ding M, Yang X Z, Su J H. Control strategy of microgrid inverter power supply based on virtual synchronous generator idea[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93.)
- [3] Zhong Q C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [4] Beck H P, Hesse R. Virtual synchronous machine[C]. The 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona: IEEE, 2007: 1-6.
- [5] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012, 10(3): 1-6.
(Zhang X, Zhu D B, Xu H Z. Virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(3): 1-6.)
- [6] Liu J, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [7] 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.
(Du W, Jiang Q R, Chen J R. Virtual inertial frequency control strategy for microgrid power supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31.)
- [8] 毛福斌, 张兴, 刘芳, 等. 基于虚拟阻尼补偿的改进型VSG控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 75-78.
(Mao F B, Zhang X, Liu F, et al. Research on

- improved VSG control strategy based on virtual damping compensation[J]. *Power Electronics*, 2016, 50(9): 75-78.)
- [9] 刘尧, 陈建福, 侯小超, 等. 基于自适应虚拟惯性的微电网动态频率稳定控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 75-82.
(Liu Y, Chen J F, Hou X C, et al. Dynamic frequency stability control strategy of microgrid based on adaptive virtual inertia[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 75-82.)
- [10] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(11): 72-77.
(Li D D, Zhu Q W, Cheng Y Z, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive inertia damping integrated control algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 72-77.)
- [11] 李鹏. 微网虚拟同步发电机下的自适应滑模控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学电气工程学院, 2017: 1-75.
(Li P. Research on adaptive sliding mode control strategy under micro-grid virtual synchronous generator[D]. Chengdu: School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2017: 1-75.)
- [12] 屈子森, 蔡云旖, 杨欢, 等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(17): 58-72.
(Qu Z S, Cai Y Y, Yang H, et al. Power decoupling control strategy of virtual synchronizer based on adaptive virtual impedance[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(17): 58-72.)
- [13] 杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 一种模式自适应的微网调频控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 67-75.
(Du Y, Su J H, Zhang L C, et al. A mode adaptive micro-frequency frequency modulation control method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 67-75.)
- [14] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的VSG控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(7): 1918-1926.
(Xu H Z, Zhang X, Liu F, et al. VSG control strategy based on virtual inertia of lead lag phase[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(7): 1918-1926.)
- [15] 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: 1-226.
(Xue D Y. Fractional calculus and fractional order control[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1-226.)
- [16] 钟其水, 李辉. 永磁同步电机分数阶微积分控制方法研究[J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(2): 246-249.
(Zhong Q S, Li H. Study on fractional calculus control method of permanent magnet synchronous motor[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011, 40(2): 246-249.)
- [17] 聂卓赟, 朱海燕, 刘建聪, 等. 基于理想Bode传递函数的分数阶PID频域设计方法及在运动控制中的应用[J]. *控制与决策*, 2019, 34(10): 2198-2202.
(Nie Z Y, Zhu H Y, Liu J C, et al. Fractional order PID frequency domain design method based on ideal Bode transfer function and its application in motion control[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(10): 2198-2202.)
- [18] 戚志东, 周茜, 卞慧娟, 等. PEMFC动态建模与模糊分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制[J]. *控制与决策*, 2017, 32(6): 1148-1152.
(Qi Z D, Zhou X, Bian H J, et al. PEMFC dynamic modeling and fuzzy fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ control[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(6): 1148-1152.)
- [19] 杨博, 束洪春, 朱德娜, 等. 基于群灰狼优化的光伏逆变器最优无源分数阶PID控制[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 593-603.
(Yang B, Shu H C, Zhu D N, et al. Optimal passive fractional-order PID control of photovoltaic inverter based on group grey wolf optimization[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(3): 593-603.)
- [20] 许爱国, 谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(1): 52-56.
(Xu A G, Xie S J. Research on digital control technology of inverter with instantaneous value feedback of capacitance current[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 52-56.)
- [21] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(24): 6508-6518.
(Wu H, Ruan X B, Yang D S, et al. Modeling and parameter design of virtual synchronous generator power loop[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6508-6518.)
- [22] 邓玉辉, 艾欣, 段正阳, 等. 基于虚拟同步发电机技术的并网逆变器的建模与仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015(4): 33-36.
(Deng Y H, Ai X, Duan Z Y, et al. Modeling and simulation of grid-connected inverter based on virtual synchronous generator technology[J]. *China Electric Power: Technical Edition*, 2015(4): 33-36.)
- [23] He J W, Li Y W, Guerrero J M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(11): 5272-5282.
- [24] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-640.
(Hu S S. Principle of automatic control[M]. Beijing: Science Press, 2007: 1-640.)

作者简介

张赟宁(1979—), 女, 副教授, 博士, 从事网络控制理论、电力系统广域稳定控制、微电网网络化控制及其应用等研究, E-mail: yunningzhang@gmail.com;

周小萌(1992—), 男, 硕士生, 从事微电网逆变器并网控制的研究, E-mail: 358592630@qq.com.

(责任编辑: 李君玲)