

基于自适应模糊滑模补偿的 VSG功率振荡抑制策略

林俊芳^{1,2,3}, 何国锋^{1,3}, 张国勇^{1,3}, 周子淳^{1,3}

(1.三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2.国网福建省电力有限公司莆田供电公司, 福建 莆田 350300; 3.河南城建学院 电气与控制工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘要: 为了获得惯性支持, 在逆变器控制设计中引入了虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 控制, 但该控制会产生功率振荡问题。为了调节系统的功率和运行状态, 文章提出一种基于自适应模糊滑模补偿的 VSG 功率振荡抑制策略。首先构建 VSG 的数学模型, 分析了 VSG 振荡原因; 其次通过李雅普诺夫函数, 设计自适应模糊滑模补偿使其频率和功角快速收敛, 以抑制 VSG 运行过程中的功率振荡, 并证明了其稳定性; 最后通过仿真和实验对比结果表明, 文章所提 VSG 控制在启动和功率突变时, 功率振荡都得到明显的抑制, 且系统超调较小, 响应时间变快, 系统运行状态得到改善。

关键词: 虚拟同步发电机; 功率振荡; 模糊滑模; 李雅普诺夫函数

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)08-1083-06

0 引言

以光伏、风电为代表的可再生能源发电技术因其取之不尽、无污染、灵活性等优点, 得到了广泛应用, 近年来装机容量不断增加。在此背景下, 分布式能源通过逆变器接入配电网的比例逐年提高^[1,2]。

逆变器作为分布式能源的并网接口, 在能量传输和系统稳定调节过程中至关重要。然而, 大量逆变器的接入使系统缺乏足够的惯性和阻尼, 使系统的稳定性更容易受到影响。为了获得系统惯性和阻尼特性, 文献[3,4]通过模拟传统同步发电机的惯性和阻尼特性, 提出了 VSG 控制。VSG 具有虚拟惯性和阻尼特性, 并且具有调频和调压功能, 能够提高系统的暂态响应特性, 但同步发电机的转子也具有振荡特性^[5-7]。这种振荡会给逆变器的功率传输和稳定调节带来巨大的负担。目前 VSG 功率振荡抑制本质上是通过调节惯性和阻尼系数等参数改变系统输出特性, 从而改善系统振荡。许多文献在单独控制惯量或阻尼上, 提出一些解决方法。文献[8]提出了一种自适应虚拟惯性控制策略, 在不同的操作状态下选择不同的转动惯量, 然而, 该方案中的虚拟惯性值采用了 Bang-Bang 控制, 引入的虚拟惯性功率的频繁变化会带

来一定的抖动, 影响系统稳定性。文献[9]提出了一种最优阻尼比控制策略来提高 VSG 系统的瞬态响应和稳定性, 从而减小振荡, 但它只在系统运行的部分过程, 而不是整个过程中保持最优阻尼比。将惯量与阻尼共同控制, 提出许多自适应惯量阻尼法。文献[10-12]研究了不同参数对 VSG 功率和频率的影响, 通过遗传算法对目标函数寻优、在功率调节不同阶段自主调节惯性和阻尼、在一定的约束条件下保持最佳阻尼比, 确定最优转动惯量和阻尼系数, 以抑制功率和频率的振荡, 但该方法系数选取过程较复杂。另外, 可通过补偿暂态过程中的阻尼来抑制功率振荡, 文献[13]利用一阶滞后环节构造暂态阻尼, 虽然该方法能将有功系统阶次降低, 易于控制, 但在抑制振荡的同时存在较大超调。文献[14]通过暂态前馈补偿和反馈补偿两种有功暂态补偿来提升系统的暂态阻尼, 有效抑制有功振荡, 且稳态偏差小, 也不存在大的超调, 但目前该方法参数设计原则未给出定量设计方法。

上述抑制振荡主要通过调节惯量和/或阻尼系数使系统运行在较好的状态, 依赖于系统设计, 滑模控制因其具有不依赖系统参数、对参数摄动和外部扰动鲁棒性强等特点, 得到了广泛的

收稿日期: 2023-07-19。

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(222300420400)。

通信作者: 何国锋(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向为微电网逆变器高效变流器控制、逆变器并联控制。E-mail: dragonhgf@hncj.edu.cn

应用。本文通过李雅普诺夫函数设计自适应模糊滑模补偿使 VSG 的频率和功角快速收敛,以抑制输出功率的振荡。首先建立 VSG 的数学模型并分析其产生振荡的原因;其次考虑 VSG 运行过程中的频率误差和功角误差,提出了一种基于自适应模糊滑模补偿的 VSG 振荡抑制策略;最后,通过仿真与实验对比本文所提 VSG 控制与传统 VSG 和自适应 VSG 控制策略^[10],证明了该方法的有效性。

1 VSG 系统拓扑

1.1 系统描述

基于 VSG 控制的并网逆变器如图 1 所示。

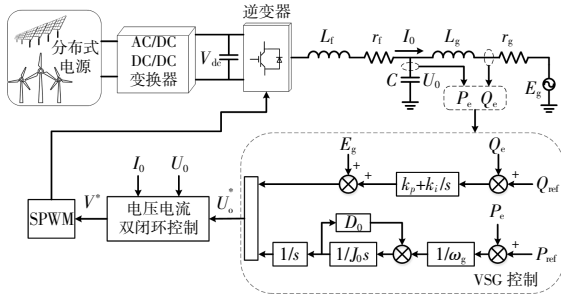


图 1 基于 VSG 控制的并网逆变器框图

Fig.1 Grid-connected inverter block diagram based on VSG control

图中: L_f, C 分别为滤波器的电感和电容; r_f 为滤波电感等效电阻; L_g, r_g 为电网侧等效电感和电阻; U_0 为 VSG 输出电压; I_0 为网侧电流。下半部分为传统 VSG 控制,经过 VSG 控制后得到参考电压 U_0^* 并通过锁相环追踪电网电压相位,再由电压电流双闭环 PI 控制器控制后得到调制信号 V^* ,最后经过正弦脉冲宽度调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 得到开关信号并由逆变器开关管执行。

1.2 VSG 数学模型及功率振荡分析

传统 VSG 控制包括有功频率和无功电压控制。其中输出的参考电压 U_0^* 是通过模拟同步发电机的转子来获得惯性和阻尼,其一般表达式为

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = w(t) - w_g \\ J\dot{w}(t) = P_{ref} - P_e - D[w(t) - w_g] \end{cases} \quad (1)$$

参考电压幅值表达式为

$$U_0 = E_g + (k_p + k_i/s)(Q_{ref} - Q_e) \quad (2)$$

式中: P_{ref}, Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率参考

值; P_e, Q_e 分别为逆变器输出有功功率和无功功率; $\delta(t)$ 为输出功率角; $w(t)$ 为输出角频率; w_g 为电网角频率; D 为 VSG 阻尼, $D = D_0 w_g, D_0$ 为阻尼系数; J 为 VSG 虚拟的惯性, $J = J_0 w_g, J_0$ 为惯性系数; E_g 为电网电压幅值; U_0 为 VSG 输出电压幅值。

逆变器的输出功率为

$$S = P_e + jQ_e = \frac{r_g E_g U_0 \cos \delta(t) - r_g E_g^2 + X E_g U_0 \sin \delta(t)}{r_g^2 + X^2} + j \frac{X E_g U_0 \cos \delta(t) - X E_g^2 - r_g E_g U_0 \sin \delta(t)}{r_g^2 + X^2} \quad (3)$$

式中: $X = w J_{g0}$

一般情况下,线路呈感性,满足 $X \gg r_g$ 。因此,可以得到简化的有功和无功输出为

$$\begin{cases} P_e = \frac{U_0 E_g}{X} \sin \delta(t) \\ Q_e = \frac{U_0 (U_0 - E_g)}{X} \end{cases} \quad (4)$$

由于输出功率角很小,因此结合式(1)有功输出可以进一步简化为

$$P_{ref} = P_e + \frac{DX}{U_0 E_g} \dot{P}_e + \frac{JX}{U_0 E_g} \ddot{P}_e \quad (5)$$

经过拉普拉斯变换后:

$$\frac{P_e(s)}{P_{ref}(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2w_n \xi s + w_n^2} \quad (6)$$

式中: $w_n = \sqrt{U_0 E_g / (JX)}$; $\xi = D \sqrt{X / (J U_0 E_g)} / 2$ 。

由式(6)可知,VSG 的功率输出为一个典型的二阶振荡系统,在有功参考指令下,系统将出现有功功率振荡及超调等二阶系统固有的问题。通常,系统惯性和阻尼利用线性二阶系统的最优阻尼比方法来进行调节^[15],即系统阻尼 $\xi = 0.707$,此时有 $D = \sqrt{2 J U_0 E_g / X}$ 。

2 自适应模糊滑模补偿设计

滑模控制不依赖系统参数以及鲁棒性强等特点,在传统 VSG 控制中加入自适应模糊滑模补偿,使得输出功率快速趋于稳定并增强其抗干扰能力。在外加控制输入 $u(t)$ 下,根据式(1)可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{w}(t) &= -\frac{D}{J} \Delta w(t) - \frac{1}{J} P_e(t) + \frac{1}{J} P_{ref} + u(t) = \\ &= -\frac{D}{J} \Delta w(t) - \frac{1}{J} \Delta P(t) + u(t) = \end{aligned}$$

$$-\frac{D}{J}\Delta w(t)-\frac{U_o E_g}{JX}\Delta\delta(t)+u(t) \quad (7)$$

式中: $\Delta\delta(t)$ 为功率角偏差, $\Delta\delta(t)=\delta(t)-\delta_0$; $\Delta w(t)$ 为电网频率偏差, $\Delta w(t)=w(t)-w_{g0}$

设计滑模面为 $s=c\Delta\delta(t)+\Delta w(t)$,其中 c 为正常数。当滑模面 $s\rightarrow 0$ 时,可以得到 $\Delta\delta(t)=\exp(-ct)$;当 $t\rightarrow\infty$ 时,有 $\Delta\delta(t)\rightarrow 0$,其中收敛速度由 c 决定,当 c 越大时,收敛速度将会越快。下面将通过李雅普诺夫函数设计控制输入,使得滑模面 $s\rightarrow 0$ 。

对滑模面 s 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c\Delta\dot{\delta}(t)+\Delta\dot{w}(t)=c\Delta w(t)-\frac{D}{J}\Delta w(t)- \\ & \frac{U_o E_g}{JX}\Delta\delta(t)+u(t) \end{aligned} \quad (8)$$

构建李雅普诺夫函数 $V=s^2/2$,求导得:

$$\dot{V}=s\dot{s}=s\left[c\Delta w(t)-\frac{D}{J}\Delta w(t)-\frac{U_o E_g}{JX}\Delta\delta(t)+u(t)\right] \quad (9)$$

设计控制输入为

$$u(t)=-c\Delta w(t)+\frac{D}{J}\Delta w(t)+\frac{U_o E_g}{JX}\Delta\delta(t)-\eta\text{sgn}(s) \quad (10)$$

式中: η 为一正常数。

将控制输入式(10)代入式(9)得 $\dot{V}=-\eta|s|\leq 0$,滑模面 s 将会逐渐趋近于0,频率偏差 $\Delta w(t)$ 和功角偏差 $\Delta\delta(t)$ 也将会逐渐趋近于0,使得输出功率快速趋于稳定。但在滑模输入式(10)中存在符号项 $-\eta\text{sgn}(s)$,这将给系统带来抖振,也会给执行器带来巨大的负担。为了解决滑模输入抖振问题,利用自适应模糊控制方法^[10],将滑模控制器中的切换项进行模糊逼近,使得符号项连续化,从而有效降低系统抖振。当采用模糊系统 $\hat{h}(s)$ 逼近符号项 $-\eta\text{sgn}(s)$ 时,系统控制输入可描述为

$$u(t)=-c\Delta w(t)+\frac{D}{J}\Delta w(t)+\frac{U_o E_g}{JX}\Delta\delta-\hat{h}(s) \quad (11)$$

式中: $\hat{h}(s)=\hat{\theta}_h\varphi(s)$, $\hat{\theta}_h$ 为权重值, $\varphi(s)$ 为模糊向量。

在理想状态下,存在最优权重值 θ_h^* ,使得 $\hat{h}(s|\theta_h^*)=\eta\text{sgn}(s)$ 。此时,根据式(8),有:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -\hat{h}(s|\hat{\theta}_h)=-\hat{h}(s|\hat{\theta}_h)+\hat{h}(s|\theta_h^*)-\hat{h}(s|\theta_h^*)= \\ & \tilde{\theta}_h\varphi(s)-\hat{h}(s|\theta_h^*) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\tilde{\theta}_h=\theta_h^*-\hat{\theta}_h$,该值为模糊系统对符号项逼近过程中的误差值。构建新的李雅普诺夫函数 $V_1=s^2/2+\tilde{\theta}_h^2/2$,并进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s\left[\tilde{\theta}_h\varphi(s)-\hat{h}(s|\theta_h^*)\right]+\tilde{\theta}_h\dot{\tilde{\theta}}_h= \\ & \tilde{\theta}_h\left[s\varphi(s)-\dot{\hat{\theta}}_h\right]-s\hat{h}(s|\theta_h^*) \end{aligned} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\theta}}_h=d(\theta_h^*-\hat{\theta}_h)/dt=-\dot{\hat{\theta}}_h \\ \hat{h}(s|\theta_h^*)=\eta\text{sgn}(s) \end{cases} \quad (14)$$

设权重值 $\hat{\theta}_h=s\varphi(s)$,带入式(13)可得 $\dot{V}_1=-\eta|s|\leq 0$ 。当 $t\rightarrow\infty$ 时,有 $s\rightarrow 0$,根据 LaSalle 不变集原理^[17],当 $\dot{V}_1=0$ 时,得到 $s=0$,因此系统稳定。由此,可以得到自适应模糊滑模补偿后的 VSG 控制框图,如图 2 所示。

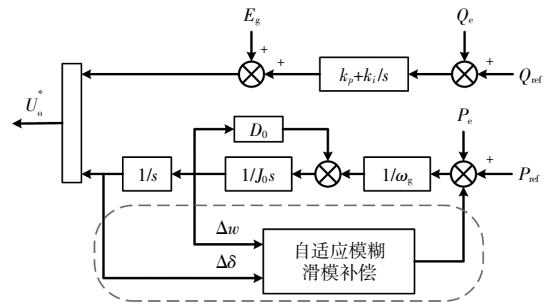


图 2 基于自适应模糊滑模补偿的 VSG 控制框图
Fig.2 VSG control block diagram based on adaptive fuzzy sliding mode compensation

3 仿真和实验分析

为验证本文所提出的基于自适应模糊滑模补偿的 VSG 控制策略的有效性,根据图 2 分别在 Matlab/Simulink 和实验中搭建系统模型,仿真及实验主电路参数如表 1 所示。将所提出的 VSG 控制策略与传统 VSG 控制和文献[10]中的自适应 VSG

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	750	网侧等效电阻 $r_g/m\Omega$	5
电网电压 E_g/V	220	开关频率/kHz	5
额定角频率 $w_g/rad\cdot s^{-1}$	100π	滤波电感 L_f/mH	0.8
滤波电感等效电阻 $r_f/m\Omega$	30	滤波电容 $C/\mu F$	10
网侧电感 L_g/mH	3.6		

控制策略进行比较,验证所提策略的有效性,控制参数如表 2 所示。

表 2 控制参数
Table 2 Control parameters

参数	数值	参数	数值
电压外环 PI 控制	5.9, 50	自适应 VSG 系数 J	1.6-2.3
电流内环 PI 控制	100, 500	自适应 VSG 系数 D	65.8-77.2
VSG 惯性系数 J	4.6	滑模参数 c	5 000
VSG 阻尼系数 D	39	滑模参数 η	1 000
k_p, k_i	0.03, 6		

3.1 仿真验证

在 0~0.4 s, 系统运行在额定工作条件下,有功功率输出为 10 kW;在 0.4 s 时,令系统输出功率变为 5 kW, 对比 3 种控制策略下系统输出变化,图 3 为频率和功率角对比图。

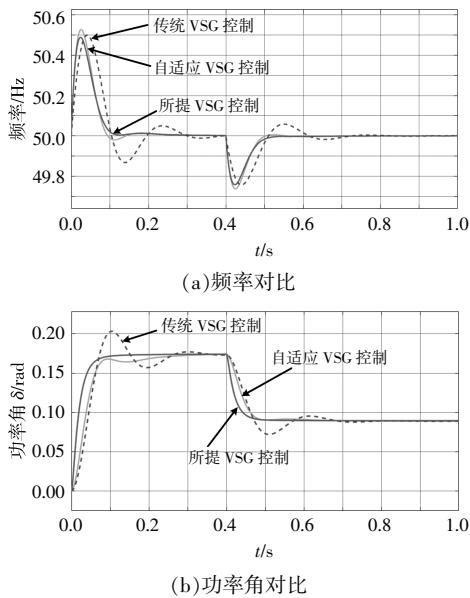


图 3 输出对比图

Fig.3 Output comparison diagram

从图 3 可以看出,系统在启动和功率突变时,

所提 VSG 控制的频率和功率角的超调要低于传统 VSG 控制和自适应 VSG 控制,且响应速度更快。这是由于自适应模糊滑模补偿的加入使系统的频率和功率角都更快地收敛到了目标值,且不包含符号项,有效地减小了由于符号项带来的抖动。

图 4 为 3 种 VSG 控制策略输出功率对比图。

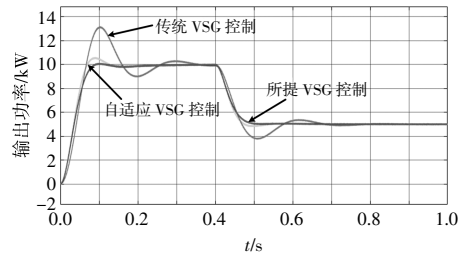


图 4 输出功率对比

Fig.4 Output power comparison

由图 4 可知,传统 VSG 控制在启动和功率突变时都有明显的振荡,相反,采用所提 VSG 控制时输出功率振荡得到了明显的抑制,自适应 VSG 控制虽然能有效抑制振荡,但是存在较大超调,且响应较慢。所提 VSG 控制根据频率偏差和功角偏差使转子方程中叠加自适应模糊滑模补偿输入,因此,在启动和 0.4 s 输出功率突变后,能更快地追踪目标值并抑制系统功率振荡,减小了超调,并且提高了系统的动态响应,改善了系统运行状况。

3.2 实验分析

为进一步验证所提控制策略的有效性,采用远宽能源 StarSim HIL 进行实验验证,其主控芯片为 TMS320F28335DSP。实验平台如图 5 所示。其实验参数与仿真一致,见表 1。系统工况同样为在 0.4 s 时,令系统输出功率突变为原来的 50%。

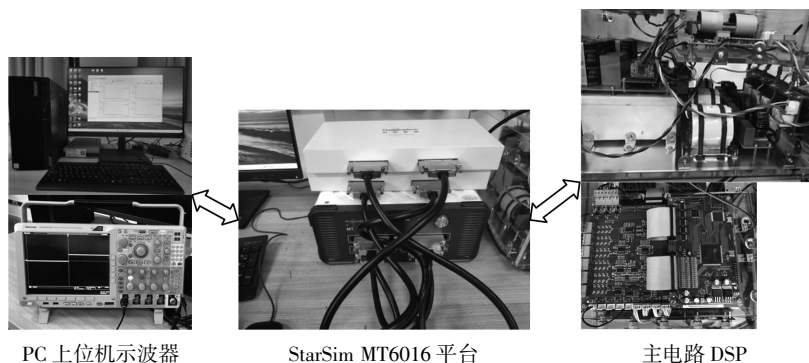


图 5 实验平台

Fig.5 Experimental platform

图 6 为实验条件下频率和输出功率对比结果。

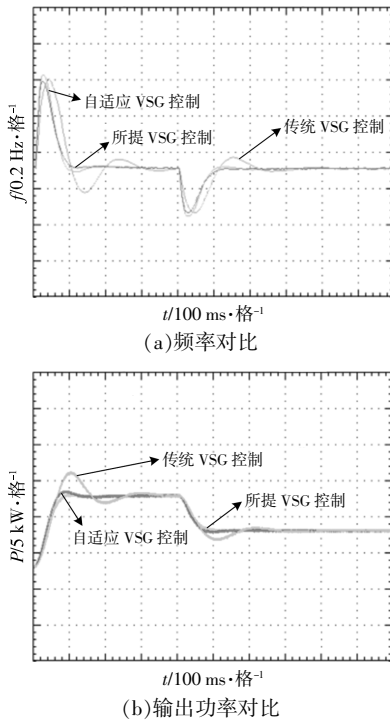


图 6 输出对比

Fig.6 Output comparison

由图 6 可知,在启动时,所提 VSG 控制无功率振荡现象,且能够快速达到稳态目标值。功率在 0.4 s 动态变化时,所提 VSG 控制能够抑制功率振荡现象,超调较小,且调节时间短,快速适应功率变化,使得输出功率能够快速满足设定需求。实验结果表明,所提的 VSG 控制策略能很好地抑制输出功率振荡,这与仿真结果一致,验证了所提控制策略的有效性。

图 7 中从上到下分别为传统 VSG、自适应 VSG 和所提 VSG 控制策略下输出电流波形。

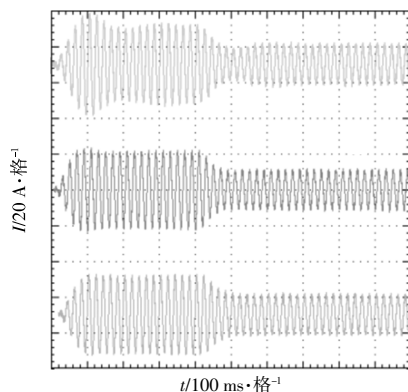


图 7 输出电流对比

Fig.7 Output current comparison

由图 7 可知:传统 VSG 存在振荡现象,系统在自适应 VSG 控制下虽然能抑制振荡,但是最大电流为 21.8 A,超调较大;系统在所提 VSG 控制下启动时,最大电流为 20.2 A,明显小于自适应 VSG 控制;在功率突变后,所提 VSG 控制在 40 ms 时快速达到调节目标值,小于自适应 VSG 控制的 100 ms,响应较快。综上对比,在所提 VSG 控制下,系统在启动和功率突变时超调较小,响应速度较快,且无明显振荡,有效地改善了系统运行状况。

4 结论

针对逆变器 VSG 控制带来的输出功率振荡问题,本文提出了一种基于自适应模糊滑模补偿的功率振荡抑制策略。根据 VSG 的数学模型及功率振荡特点设计了滑模补偿,并证明了其稳定性。滑模控制能够很好地改善传统 VSG 控制下逆变器的运行状况,且不依赖系统参数,鲁棒性强。仿真和实验表明,相比于传统 VSG 和自适应 VSG 控制策略,在启动过程和功率突变调节时,所提 VSG 控制超调较小、响应速度较快,在抑制功率振荡的同时,有效改善了系统运行状态。

参考文献:

- [1] 程国栋,邵宣,王贵峰.虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J].可再生能源,2021,39(12):1655-1661.
- [2] 王婷婷,王玥,于红丽,等.含高比例新能源的新型配电系统韧性资源调度 [J]. 可再生能源,2022,40(9):1249-1256.
- [3] Shimiao Chen, Yao Sun, Hua Han, et al. Dynamic frequency performance analysis and improvement for parallel VSG systems considering virtual inertia and damping coefficient [J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2023,11(1):478-489.
- [4] 王继磊,张兴,朱乔华,等.虚拟同步发电机暂态稳定性分析与控制策略 [J]. 电机与控制学报,2022,26(12):28-37.
- [5] 王亚维,刘邦银,段善旭,等.虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究 [J]. 中国电机工程学报,2019,39(20):5885-5893.
- [6] 刘铖,王旭,张宇驰.基于负荷模式能量的永磁风机电网功率振荡特性分析[J].东北电力大学学报,2022,42(4):70-78.
- [7] 马钦林,杨欢,屈子森,等.改善虚拟同步发电机阻尼

- 特性的设计方法[J].电网技术, 2021, 45(1): 269–275.
- [8] Jaber Alipoor, Yushi Miura, Toshifumi Ise. 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.
- [9] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴. 微电网逆变器自适应阻尼系数 VSG 控制策略研究 [J]. 控制工程, 2021, 28(8): 1628–1633.
- [10] Fei Wang, Lijun Zhang, Xiayun Feng, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5124–5133.
- [11] 王秀云, 刘国钦, 梁晓龙, 等. 基于改进虚拟同步发电机的预同步并网控制研究 [J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 92–98.
- [12] 龚仁喜, 顾佳宇. 负荷虚拟同步机惯性与阻尼自适应控制策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 130–135.
- [13] 李新, 刘国梁, 杨苒晨, 等. 具有暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略及无缝切换方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2081–2088.
- [14] 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.
- [15] Zhongyang Wang, Yunjun Yu, Weinan Gao, et al. Adaptive, optimal, virtual synchronous generator control of three-phase grid-connected inverters under different grid conditions—an adaptive dynamic programming approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7388–7399.
- [16] Shuaishuai Sui, Tong Zhao. Active disturbance rejection control for optoelectronic stabilized platform based on adaptive fuzzy sliding mode control [J]. ISA Transactions, 2022, 125: 85–98.
- [17] Ti -Chung Lee, Weiguo Xia, Youfeng Su, et al. Exponential consensus of discrete-time systems based on a novel Krasovskii–LaSalle theorem under directed switching networks [J]. Automatica, 2018, 97: 189–199.

VSG power oscillation suppression strategy based on adaptive fuzzy sliding mode compensation

Lin Junfang^{1,2,3}, He Guofeng^{1,3}, Zhang Guoyong^{1,3}, Zhou Zichun^{1,3}

(1.School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Putian Power Supply Company, Putian 350300, China; 3.School of Electrical and Control Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: The virtual synchronous generator (VSG) control is proposed to obtain inertial support in the inverter control design, but it will bring the problems of power oscillation. In order to improve the power regulation and operation status of system, this paper proposes a VSG power oscillation suppression strategy based on adaptive fuzzy sliding mode compensation. Firstly, the mathematical model of VSG is constructed, and the causes of VSG oscillation are analysed. Secondly, an adaptive fuzzy sliding mode compensation is designed by Lyapunov function to make its frequency and power angle converge quickly, so as to suppress the power oscillation, and its stability is proved. Finally, the simulation and experimental results show that the proposed VSG control strategy can significantly suppress the power oscillation during start-up and power sag. The system overshoot is reduced and the response time is faster, so the system operation state is improved.

Keywords: virtual synchronous generator; power oscillation; fuzzy sliding mode; lyapunov function