

基于自适应 Terminal 滑模控制方法的 VSG 控制

严彬彬, 王宝华

(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 由于分布式电源并网逆变器存在的低惯性、欠阻尼特性会影响电力系统稳定性, 利用考虑发电机励磁与汽门综合控制的同步发电机四阶模型, 设计了基于自适应 Terminal 滑模控制方法的虚拟同步发电机控制方案。针对系统的 2 个输入变量, 构造了 2 个非奇异的 Terminal 滑模函数, 由于 Terminal 滑模函数为非线性函数, 使得误差可以快速收敛, 从而保证了控制器良好的控制效果。仿真结果验证了所提控制策略可以为系统提供必要的惯性和阻尼, 保证系统在参数不确定和存在外界扰动情况下的鲁棒性, 能够抑制振荡并提高电力系统的稳定性。

关键词: 虚拟同步发电机; 并网逆变器; Terminal 滑模控制; 稳定性; 鲁棒性

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.022

0 引言

全球能源的日益匮乏, 环境问题的日渐突出, 是近年来社会的热点问题, 为此, 清洁能源的利用也越来越受到人们的关注^[1]。分布式发电技术和微电网技术作为有效的载体, 对其进行深入研究有其不可忽视的有益作用^[2]。常见的分布式电源产生的电能需要通过并网逆变器并网输出, 但是不同于传统的同步发电机, 逆变器本身响应速度快、几乎没有转动惯量, 这导致其难以参与电网的调节, 更无法为稳定性较差的微网提供必要的阻尼作用。

鉴于此, 欧洲 VSYNC 项目率先提出了虚拟同步发电机(VSG)的概念^[3]。借助同步发电机的机械方程和电磁方程来控制逆变器, 使得逆变器在机理上和特性上均能与同步发电机相媲美, 该类控制策略称为 VSG 技术^[4-6], 其有望在未来的分布式发电技术中发挥重要作用。随后, 钟庆昌教授提出同步逆变器的概念^[6], 使逆变器工作在类似同步发电机的特性下。文献[7]研究了电流源型 VSG 的控制策略, 但此种控制策略没有模拟同步发电机的转子运动特性。相比之下, 电压源型 VSG 控制策略更适用于 VSG 技术的研究。文献[8]研究了 VSG 的有功、无功调节方案, 详细分析了虚拟惯性和阻尼的整定方法, 实现了 VSG 的离/并网无缝切换。文献[9]提出了一种改进型虚拟惯量控制, 以提高功率的动态响应, 减小功率振荡。文献[10]针对传统 VSG 频率调节的有差性以及二次调频控制参数难选且调节精度不理想的问题, 提出了一种使频率可以快速自适应调节的 VSG 控制方法。文献[11]对不平衡与非线性混合负载下的 VSG 控制进行了研究, 着重于消除电压不平衡和抑制谐波。文献[12]着重研究了弱电网条件下 VSG-电网互联系统的交互稳定性。

上述文献对于 VSG 控制的研究主要还是以线

性控制方法和理论为基础, 模拟同步发电机的经典二阶模型。但经典二阶模型不能很好地模拟同步发电机的动态响应过程, 且传统单变量比例-积分-微分(PID)控制在应对系统发生参数摄动和外部扰动时的鲁棒性较差, 最终导致系统控制效果不佳。文献[13]通过引入能量函数作为系统输出变量, 实现对脉宽调制(PWM)整流器模型的完全反馈线性化, 以此提高 VSG 控制系统在电压跌落时的动态响应速度。值得注意的是, 反馈线性化方法要求系统模型精确已知, 但事实上电力系统存在大量未知参数和不确定扰动, 这些不确定因素必然会影响到控制效果, 因此有必要提高系统的鲁棒性。文献[14]研究了基于 Hamilton 系统方法的 VSG 控制方案, 取得了不错的控制效果, 但是控制器仅仅考虑了摄动的系统参数, 没有考虑外扰动的的影响。滑模变结构控制因其较快的响应速度, 以及对外界干扰和参数摄动的鲁棒性强, 非常适合应用于模型复杂、变化剧烈、存在大量不确定扰动的电力系统中^[15]。文献[16]将线性二次型最优控制与积分滑模控制相结合, 设计了一种多目标最优滑模鲁棒励磁控制器。文献[17]将滑模变结构控制应用于汽轮机的调速器。文献[18]设计了一种新型定频 PWM 自适应滑模控制策略, 用于改善直流微电网的稳定性。普通滑模控制一般选择线性的滑模面, 迫使系统状态按照预定的滑动轨迹运动并渐近地收敛至 0。但无论如何, 状态跟踪误差不会在有限时间内收敛至 0, 而 Terminal 滑模控制可以改进系统控制的收敛速度。因此, 本文在以上研究的基础上, 采用 Terminal 滑模控制理论设计 VSG 控制器。根据含汽门开度和励磁系统的四阶同步发电机模型来模拟同步发电机的动态特性, 通过构造 2 个非奇异的 Terminal 滑模面, 实现控制系统 2 个输入变量的解耦控制。在 MATLAB/Simulink 中通过仿真验证了本文所提控制方法的有效性。

1 Terminal 滑模控制的基本原理

以一阶非线性动态系统为例,本节简单说明 Terminal 滑模控制的基本原理。

$$\dot{x} = f(x) + u \quad (1)$$

其中, x 为状态变量; u 为系统控制量。

选滑模面如下:

$$s = \dot{x} + \beta x^{a/b} = 0 \quad (2)$$

其中, $\beta > 0$; a 和 b 均为正奇数,且有 $a > b$ 。

由式(2)可得:

$$u = -\beta x^{a/b} - f(x) \quad (3)$$

$$t = -\frac{1}{\beta} \int_{x(0)}^0 \frac{1}{x^{a/b}} dx = \frac{b}{\beta(b-a)} |x(0)|^{1-a/b} \quad (4)$$

其中, t 为 x 由初始值 $x(0)$ 收敛至 0 的时间。由此可知, Terminal 滑模控制可以改进系统控制的收敛速度,使状态跟踪误差于有限时间内收敛至 0。

2 VSG 控制

2.1 VSG 控制结构

图 1 为本文所设计的 VSG 控制策略的整体框图。图中, e_{abc} 为逆变器的输出电压; i_{abc} 为流过滤波电感的电流; u_{oabc} 为并网点电压; i_{oabc} 为并网点电流; L 为滤波电感; C 为滤波电容; Z_L 为线路阻抗。本文假设储能系统的荷电状态能够满足系统的输出要求,忽略分布式电源本身的动态响应,因此可以将带有储能的分布式电源侧等效为一个直流电压源,这将作为系统的原动机部分,为整个 VSG 系统提供电能。VSG 控制包括有功控制、转子运动方程、励磁控制、虚拟阻抗和电压电流双环控制 5 个部分,其中外环控制中的有功控制与转子运动方程部分完成对同

步发电机频率控制特性的模拟,励磁控制部分主要完成对电压控制特性的模拟。

图 1 中还表示了逆变器模拟同步发电机的等效关系,将逆变器的滤波电感和电容等效为同步发电机的同步电抗,滤波电感和功率器件的电阻等效为同步发电机的同步电阻(一般很小,分析时可以忽略),逆变器的输出电压等效为同步发电机的暂态电动势, u_{oabc} 等效为同步发电机的端电压, i_{oabc} 等效为同步发电机的定子电流。通过 VSG 控制策略,最终使分布式电源的并网功率、电压和电流展现出类似同步发电机的特性。

2.2 基于自适应 Terminal 滑模的 VSG 控制

利用含励磁系统和汽门调节的同步发电机四阶模型来模拟同步发电机特性,则其综合控制的数学模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e \\ \dot{E}'_q = -\frac{X_{d\Sigma}}{X'_d T_{d0}} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{X_d - X'_d}{X'_d \Sigma} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} v_f \\ \dot{P}_m = (-P_m + P_{m0} + \mu) / T_s \end{cases} \quad (5)$$

其中, δ 为 VSG 转子角; ω 为转子角速度; ω_0 为电网同步角速度; D 为阻尼系数; H 为惯性时间常数; E'_q 为暂态电动势; V_s 为无穷大系统电压; T_{d0} 为励磁绕组时间常数; P_{m0} 为系统有功功率参考值; P_m 为系统输入有功功率; P_e 为系统输出电磁功率; T_s 为系统时间常数; X_d 为 d 轴同步电抗; X'_d 为发电机暂态电抗; $X_{d\Sigma}$ 、 $X'_{d\Sigma}$ 分别为 X_d 、 X'_d 同线路阻抗之和; v_f 为励磁电压; μ 为主汽门控制输入。其中,系统输出电磁功率为:

$$P_e = \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta + d \quad (6)$$

其中, d 为由外界干扰及参数摄动造成的扰动量。为了便于分析和设计控制器,令:

$$\begin{cases} z_1 = \delta - \delta_0 \\ z_2 = \omega - \omega_0 \\ z_3 = -(P_e - P_{e0}) \\ z_4 = P_m - P_{m0} \end{cases} \quad (7)$$

其中,下标为 0 的变量表示各个状态量的初始状态值。令 $u_1 = v_f$ 、 $u_2 = \mu$,结合式(7),将式(5)改写为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \frac{\omega_0}{H} z_3 + \frac{\omega_0}{H} z_4 - \frac{D}{H} z_2 \\ \dot{z}_3 = F(z) + G(z) u_1 + d_1 \\ \dot{z}_4 = (-z_4 + u_2) / T_s + d_2 \end{cases} \quad (8)$$

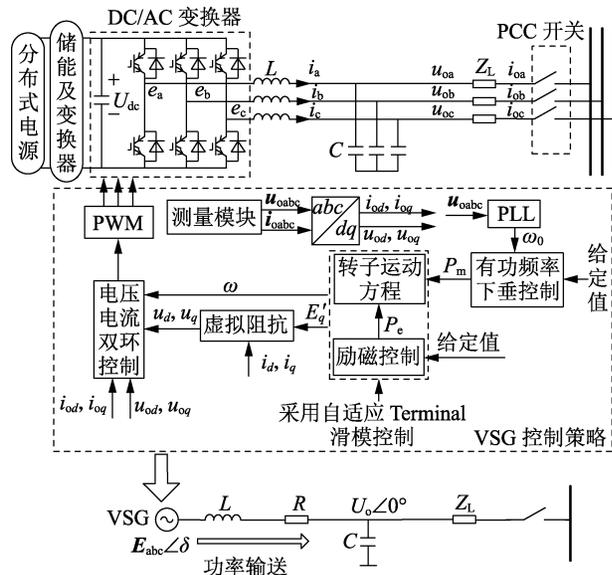


图 1 VSG 控制框图

Fig.1 Control block diagram of VSG

其中, d_1 为考虑励磁控制的系统扰动; d_2 为系统机械功率波动造成的扰动。并且假设存在未知的正常数 D_1 和 D_2 使得 $|d_1| < D_1$ 、 $|d_2| < D_2$, 并有:

$$\left\{ \begin{aligned} F(z) &= -\frac{E'_q}{X'_{d\Sigma}} V_s z_2 \cos(z_1 + \delta_0) + \\ &\quad \frac{X_{d\Sigma} V_s E'_q}{(X'_{d\Sigma})^2 T_{d0}} \sin(z_1 + \delta_0) - \\ &\quad \frac{V_s^2 (X_d - X'_d)}{(X'_{d\Sigma})^2 T_{d0}} \sin(z_1 + \delta_0) \times \\ &\quad \cos(z_1 + \delta_0) \\ G(z) &= -\frac{V_s}{X'_{d\Sigma} T_{d0}} \sin(z_1 + \delta_0) \\ d_1 &= -\dot{d} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

系统存在 2 个输入变量, 为了便于控制器的设计, 实现 u_1 、 u_2 的解耦控制, 令:

$$\left\{ \begin{aligned} z_5 &= \int_0^t z_1 d\tau \\ z_6 &= \int_0^t z_3 d\tau \\ z_7 &= \int_0^t z_4 d\tau \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= z_6 + c_1 z_5 + c_2 z_1 \\ \sigma_2 &= z_3 + c_1 z_1 + c_2 z_2 \\ \dot{\sigma}_1 &= \sigma_2 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_3 &= z_7 + c_3 z_5 + c_4 z_1 \\ \sigma_4 &= z_4 + c_3 z_1 + c_4 z_2 \\ \dot{\sigma}_3 &= \sigma_4 \end{aligned} \right. \quad (12)$$

其中, $c_i > 0 (i=1, 2, 3, 4)$ 。

在建立了考虑参数不确定性和外界干扰的系统模型后, 下面对自适应 Terminal 滑模控制器进行设计。

针对 2 个控制变量, 取 2 个非奇异的 Terminal 滑模函数如下:

$$\left\{ \begin{aligned} s_1 &= \sigma_1 + \frac{1}{\beta} \sigma_2^{a/b} \\ s_2 &= \sigma_3 + \frac{1}{\beta} \sigma_4^{a/b} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

其中, $\beta > 0$; a 和 b 均为正奇数, 且取 $1 < a/b < 2$ 。

Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1} (\hat{D}_1 - D_1)^2 + \frac{1}{2\gamma_2} (\hat{D}_2 - D_2)^2 \quad (14)$$

其中, γ_1, γ_2 均大于 0; $\hat{D}_i (i=1, 2)$ 为 D_i 的估计。则:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 + \frac{1}{\gamma_1} \hat{D}_1 (\hat{D}_1 - D_1) + \frac{1}{\gamma_2} \hat{D}_2 (\hat{D}_2 - D_2) = \\ & s_1 \left(\sigma_2 + \frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_2^{a/b-1} \dot{\sigma}_2 \right) + s_2 \left(\sigma_4 + \frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_4^{a/b-1} \dot{\sigma}_4 \right) + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\gamma_1} \hat{D}_1 (\hat{D}_1 - D_1) + \frac{1}{\gamma_2} \hat{D}_2 (\hat{D}_2 - D_2) \quad (15)$$

由于:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\sigma}_2 &= F(z) + G(z) u_1 + d_1 + c_1 z_2 + c_2 \dot{z}_2 \\ \dot{\sigma}_4 &= (-z_4 + u_2) / T_s + d_2 + c_3 z_2 + c_4 \dot{z}_2 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

故设计控制律如下:

$$u_1 = -\frac{1}{G(z)} \left[F(z) + c_1 z_2 + c_2 \dot{z}_2 + \beta \frac{b}{a} \sigma_2^{2b-a} + \hat{D}_1 \operatorname{sgn}(s_1) \right] \quad (17)$$

$$u_2 = -T_s \left[-\frac{z_4}{T_s} + c_3 z_2 + c_4 \dot{z}_2 + \beta \frac{b}{a} \sigma_2^{2b-a} + \hat{D}_2 \operatorname{sgn}(s_2) \right] \quad (18)$$

将控制律式(17)和(18)代入式(15)得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_2^{a/b-1} (d_1 s_1 - \hat{D}_1 |s_1|) + \\ & \frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_4^{a/b-1} (d_2 s_2 - \hat{D}_2 |s_2|) + \\ & \frac{1}{\gamma_1} \hat{D}_1 (\hat{D}_1 - D_1) + \frac{1}{\gamma_2} \hat{D}_2 (\hat{D}_2 - D_2) \end{aligned} \quad (19)$$

设计扰动的自适应律为:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\hat{D}}_1 &= \gamma_1 \frac{a}{b} \frac{1}{\beta} \sigma_2^{a/b-1} |s_1| \\ \dot{\hat{D}}_2 &= \gamma_2 \frac{a}{b} \frac{1}{\beta} \sigma_4^{a/b-1} |s_2| \end{aligned} \right. \quad (20)$$

则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_2^{a/b-1} (d_1 s_1 - D_1 |s_1|) + \\ & \frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_4^{a/b-1} (d_2 s_2 - D_2 |s_2|) \end{aligned} \quad (21)$$

由于 $\beta > 0$, a 和 b 均为正奇数, 且取 $1 < a/b < 2$, 所以当 $\sigma_2 \neq 0$ 时, 有:

$$\frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_2^{a/b-1} > 0 \quad (22)$$

当 $\sigma_4 \neq 0$ 时, 有:

$$\frac{1}{\beta} \frac{a}{b} \sigma_4^{a/b-1} > 0 \quad (23)$$

又因为 $|d_1| < D_1, s_1 \leq |s_1|, |d_2| < D_2, s_2 \leq |s_2|$, 所以 $d_1 s_1 - D_1 |s_1| < 0, d_2 s_2 - D_2 |s_2| < 0$ 。综上, 只要 σ_2 与 σ_4 不都为 0, 就有 $\dot{V}_1 < 0$ 成立, 故系统满足 Lyapunov 稳定性条件。

那么, 当 $\sigma_2 = 0$ 且 $\sigma_4 = 0$ 时, 有:

$$\left\{ \begin{aligned} z_3 &= -(c_1 z_1 + c_2 z_2) \\ z_4 &= -(c_3 z_1 + c_4 z_2) \end{aligned} \right. \quad (24)$$

此时取 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = \frac{1}{2}A(c_1+c_3)z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (25)$$

则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= A(c_1+c_3)z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 = \\ & z_2(Az_3+Az_4-Bz_2) + A(c_1+c_3)z_1z_2 = \\ & -A(c_2+c_4)z_2^2 - Bz_2^2 \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $A = \omega_0/H$; $B = D/H$ 。由式(26)可知 $\dot{V}_2 \leq 0$ 。综上,本文设计的 Terminal 滑模控制器满足 Lyapunov 稳定性条件。

式(17)、(18)为基于自适应 Terminal 鲁棒滑模综合控制的 VSG 控制方法。系统机械功率的控制是通过模拟同步发电机的有功频率下垂特性,该控制环节的计算公式如下:

$$P_m = P_{m0} + K_\omega(\omega_{ref} - \omega_0) \quad (27)$$

其中, K_ω 为调节系数; ω_{ref} 为角频率参考值。并且根据等效关系,控制器输出的模拟暂态电动势与并网电压电流应满足:

$$\begin{cases} u_q = E'_q - X'_{d\Sigma} i_d \\ u_d = X'_{q\Sigma} i_q \end{cases} \quad (28)$$

将利用式(28)所得的输出模拟端电压作为电压电流双环控制的输入,得到 PWM 驱动信号,以实现逆变器控制。

3 仿真分析

为了验证本文所提控制方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了如图 2 所示的单机无穷大系统。由 2.1 节可知,本文将带有储能的分布式电源等效为直流电压源,系统采用所提基于自适应 Terminal 鲁棒滑模综合控制的 VSG 控制方法。具体的系统仿真参数如下:大电网电压为 380 V(线电压),频率为 50 Hz;VSG 额定有功功率为 10 kW,直流侧电压为 800 V,输出滤波电感 $L = 25$ mH,输出滤波电容 $C = 200$ F,PWM 开关频率 $f_s = 1$ kHz,阻尼系数 $D = 10$,惯性时间常数 $H = 2$ s, $T_{d0} = 5$ s;线路长度为 20 km,每千米电阻为 0.4 Ω ,每千米电抗为 0.17 Ω 。

作为对比分析的传统下垂控制,其有功功率 P 与频率 f 、无功功率 Q 与电压 u 的下垂关系为:

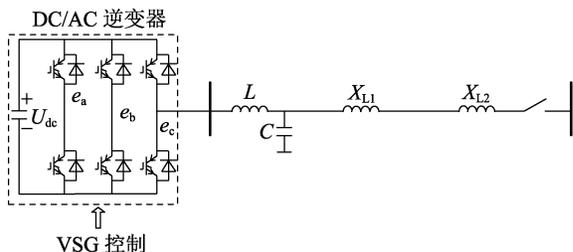


图 2 系统仿真图

Fig.2 Diagram of simulation system

$$\begin{cases} f = f_{ref} + (P_{m0} - P)K_p \\ u = u_{ref} + (Q_{m0} - Q)K_Q \end{cases} \quad (29)$$

其中, f_{ref} 为参考频率,取 50 Hz; K_p 为有功频率下垂系数; u_{ref} 为电网电压; K_Q 为无功电压下垂系数; Q_{m0} 为无功功率输入设定值。下垂控制环节输出的频率和电压参考值,经过电压电流双环控制得到 PWM 驱动信号,进而控制并网逆变器,具体参数如下:下垂控制模块中 $K_p = 0.1$, $K_Q = 0.05$;PI 控制模块中 $k_p = 2$, $k_i = 0.5$ 。

控制器相关设计参数如下: $c_1 = 10$, $c_2 = 5$, $c_3 = 5$, $c_4 = 1$, $a = 7$, $b = 5$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 10$, $\beta = 0.2$ 。具体设置 3 种仿真情况对本文所提控制方案的性能进行验证。

情况 1:当系统完成启动过渡到平稳运行状态后,在 $t = 6$ s 设置分布式电源有功出力由 5 kW 突增至 8 kW。观察此种小扰动下 VSG 的并网电流情况以及有功功率与频率响应,并与传统下垂控制进行比较,以验证其是否可以模拟出类似同步发电机的输出特性,具体如图 3—5 所示,图中 I_a 为标幺值,后同。

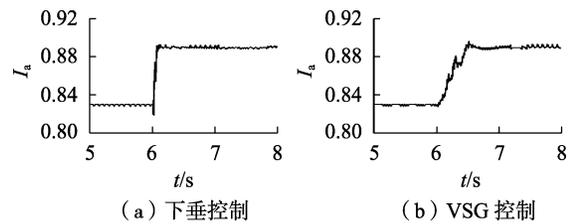


图 3 a 相电流有效值对比

Fig.3 Comparison of phase-a current effective values

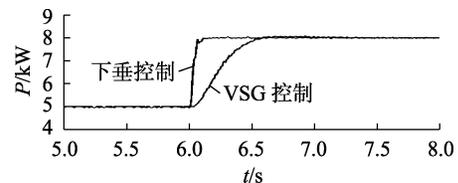


图 4 有功功率响应对比

Fig.4 Comparison of active power responses

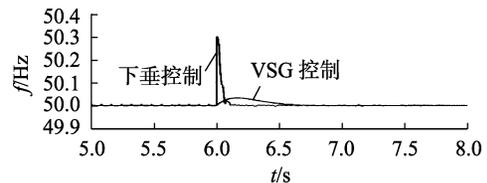


图 5 系统的频率响应对比

Fig.5 Comparison of system frequency responses

并网情况下,分布式电源出力的波动对输出电压几乎没有影响,故着重观察系统的并网电流情况以及有功和频率响应。由图 3 和图 4 可知,采用下垂控制的系统电流与有功功率约在 0.2 s 内达到稳定状态,而采用本文设计的控制方案,系统电流与有功功率均经过 0.5 s 上升至设定值,表现出了一定的惯

性。由图 5 可知,下垂控制下的系统频率在变化过程中尖峰值达到了 50.3 Hz,超出了频率的允许范围,而本文所设计的控制方案下,系统频率未超过 50.05 Hz,其变化很小且较为缓慢。整体来看,采用基于 Terminal 滑模的 VSG 控制方案给系统提供了一定的惯性和阻尼,使系统具有类似同步发电机的输出特性。

情况 2: $t=9\text{ s}$ 时,图 2 所示的线路中点发生三相接地短路故障,0.05 s 后故障切除。观察在大扰动下 VSG 控制方案是否具有优越性,VSG 系统输出电压、电流对比具体如图 6—9 所示,图中 V_{abc} 、 I_{abc} 、 V_t 均为标幺值。

由图 6 和图 7 可以看出,当系统发生三相接地短路故障时,采用本文所提 VSG 控制方案后,VSG 系统输出电压与电流的畸变有所减弱;从图 8 中可以看出,下垂控制下的系统功率振荡幅值在 5~13.8 kW 之间,而采用本文控制方案的系统功率振荡在 7~12.5 kW 之间,功率振荡幅度明显减小;由图 9 可以看出,本文方案下系统在发生三相接地短路故障时,频率振荡范围仅为 49.95~50.12 Hz,满足电能质

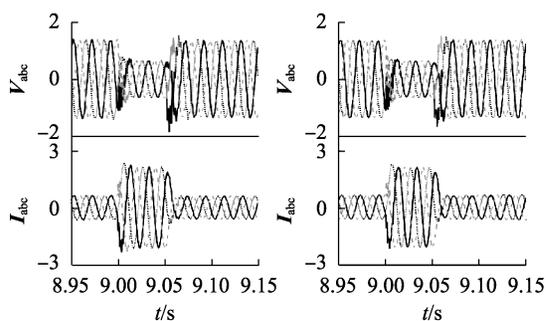


图 6 三相接地短路故障下电压、电流波形对比

Fig.6 Comparison of voltage and current waveforms under three-phase grounding short circuit fault

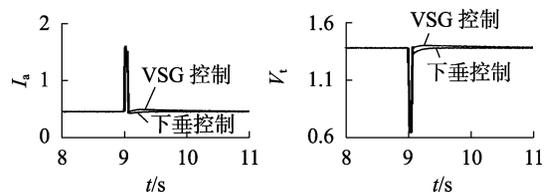


图 7 三相接地短路故障下电流有效值及机端电压对比

Fig.7 Comparison of current effective values and terminal voltages under three-phase grounding short circuit fault

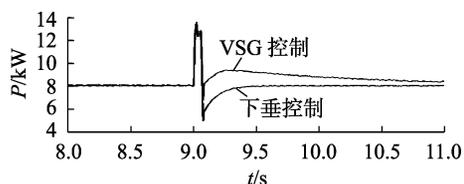


图 8 三相接地短路故障下的有功功率响应对比

Fig.8 Comparison of active power responses under three-phase grounding short circuit fault

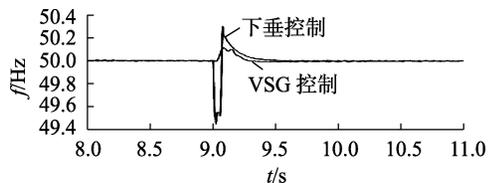


图 9 三相接地短路故障下的频率响应对比

Fig.9 Comparison of system frequency responses under three-phase grounding short circuit fault

量的要求,而下垂控制下的系统频率振荡范围在 49.45~50.32 Hz 之间,振荡较为严重。综合图 6—9,基于 Terminal 滑模的 VSG 控制方案具有给系统提供惯性和阻尼、降低功率和频率振荡幅值、改善系统稳定性的优点且整体控制效果优于下垂控制。

情况 3:系统参数摄动。VSG 的阻尼系数 D 、惯性时间常数 H 、励磁绕组时间常数 T_{d0} 、系统时间常数 T_s 这些主要的仿真控制参数一般确定不存在摄动问题。而滤波参数等效为同步发电机的同步电抗,其参数摄动会直接影响输出电压中的谐波分量,影响电能质量。所以本文为验证系统参数摄动时,自适应 Terminal 滑模控制的优越性,针对标准情况下设计的控制参数,在滤波参数摄动的情况下,对比自适应 Terminal 滑模控制与普通下垂控制的仿真结果,如图 10 和 11 所示。

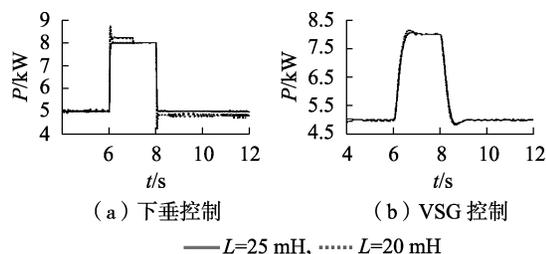


图 10 滤波参数摄动下的有功功率响应对比

Fig.10 Comparison of active power responses under perturbation of filter parameter

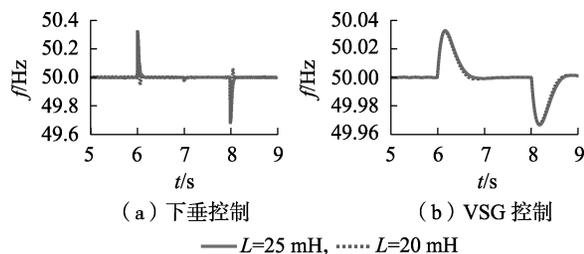


图 11 滤波参数摄动下的频率响应对比

Fig.11 Comparison of frequency responses under perturbation of filter parameter

标准情况下 $L=25\text{ mH}$, $C=200\text{ }\mu\text{F}$;滤波参数摄动情况下 $L=20\text{ mH}$, $C=200\text{ }\mu\text{F}$ 。设置系统有功出力在 6 s 时由 5 kW 突增至 8 kW,8 s 时由 8 kW 降为 5 kW。

综合图 10 和 11 可知,采用本文控制方案时,在滤波参数不符合标准参数的情况下,系统输出有功

功率的实际值与标准参数基本一致。而采用普通下垂控制时,控制效果有所下降,表现为在 6 s 有功出力突增时,输出的有功功率突增至 8.7 kW,且在 6~8 s 输出有功功率过多;在 8 s 有功出力下降时,输出的有功功率突降至 4.8 kW,且 8 s 之后输出有功功率不足 5 kW。在频率上也可看出,本文所采用的 VSG 控制方案在滤波参数有偏差时,表现出了良好的频率跟踪效果,而普通下垂控制下在有功出力突增过程中,由于参数摄动,频率的振荡加剧,控制效果较差。

设置滤波电感和电容最大误差为 20%,图 12 为 $L=20\text{ mH}$ 、 $C=160\text{ }\mu\text{F}$ 、 $L=25\text{ mH}$ 、 $C=200\text{ }\mu\text{F}$ 及 $L=30\text{ mH}$ 、 $C=240\text{ }\mu\text{F}$ 3 种情况下采用基于自适应 Terminal 滑模控制的 VSG 控制方案的系统有功功率和频率响应对比图。

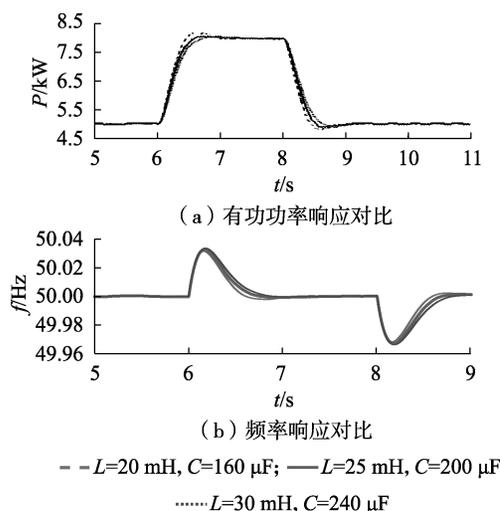


图 12 改变滤波参数时有功及频率响应对比

Fig.12 Comparison of active power and frequency responses when changing filter parameters

由图 12 可以看出,在系统有功出力突增与突减的扰动下,频率的变化范围没有超过 $\pm 0.08\%$,且在滤波参数均比标准参数低或高 20% 的情况下,采用本文控制方案的系统,其有功功率与频率响应都展现出了很好的跟踪效果,这说明其对滤波参数的变化不敏感,系统具有较好的鲁棒性。

综合以上分析可得,在滤波参数摄动的情况下,基于自适应 Terminal 滑模控制的 VSG 控制能够及时调整控制中的误差,使得输出的有功功率和频率能够准确地跟踪参考值。这表明本文所提控制方法对参数变化不敏感,可以有效克服系统滤波参数不确定性的影响,提高系统的鲁棒性。

4 结论

本文设计了基于自适应 Terminal 鲁棒滑模控制的 VSG 控制方案。通过模拟同步发电机汽门开度和励磁系统的四阶模型,结合 VSG 参数可调的优

点,实现了逆变系统对同步发电机输出特性的模拟。仿真结果表明,采用本文方案可以为逆变系统提供虚拟阻尼和惯性,可以保证系统在不确定性和外界扰动情况下的鲁棒性和稳定性。尤其在抑制频率振荡方面,表现出了良好的控制效果,改善了系统的稳定性。通过与下垂控制的对比验证了本文所提控制方法的有效性与优越性。

参考文献:

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望: 试论三代电网[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):1-11.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [3] 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 Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77.
- [4] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C] // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Spain, Malaga: IEEE, 2011: 1-6.
- [5] TOM L. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control[D]. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2011.
- [6] 肖湘宁,陈萌. 不平衡电压下虚拟同步发电机功率控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):193-200.
XIAO Xiangning, CHEN Meng. Power control of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 193-200.
- [7] HIRASE Y, ABE K, SUGIMOTO K, et al. A grid connected inverter with virtual synchronous generator model of algebraic type[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2012, 132(4): 371-380.
- [8] 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 application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [9] 刘芳,曹伟,余勇. 虚拟同步发电机(VSG)技术研究[J]. 电气技术,2014(增刊1):1-8.
LIU Fang, CAO Wei, YU Yong. Research on Virtual Synchronous Generator(VSG) technology[J]. Electrical Engineering, 2014 (Supplement 1): 1-8.
- [10] 田雨青,郑天文. 基于自适应调节的虚拟同步发电机频率控制[J]. 南方电网技术,2014,8(5):76-79.
TIAN Yuqing, ZHENG Tianwen. The frequency control of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting[J]. Southern

- Power System Technology, 2014, 8(5): 76-79.
- [11] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 不平衡与非线性混合负载下的虚拟同步发电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6086-6095.
- SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. A control strategy for unbalanced and nonlinear mixed loads of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6086-6095.
- [12] 韩刚, 蔡旭. 虚拟同步发电机输出阻抗建模与弱电网适应性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 116-122.
- HAN Gang, CAI Xu. Output impedance modeling of virtual synchronous generator and its adaptability study in a weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 116-122.
- [13] 孟建辉, 石新春, 付超, 等. 三相 VSG 系统的高性能非线性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 863-871.
- MENG Jianhui, SHI Xinchun, FU Chao, et al. A high-performance nonlinear control strategy of three-phase VSG systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 863-871.
- [14] 马燕峰, 俞人楠, 刘会强, 等. 基于 Hamilton 系统方法的 VSG 控制研究[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2543-2553.
- MA Yanfeng, YU Rennan, LIU Huiqiang, et al. The analysis of VSG control algorithm based on Hamiltonian system[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2543-2553.
- [15] 邹德虎, 王宝华. 汽轮发电机自适应 Terminal 滑模综合控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 33-42.
- ZOU Dehu, WANG Baohua. Integrated adaptive Terminal sliding mode controller for turbo-generator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 33-42.
- [16] 李慧敏. 计及随机扰动的电力系统励磁控制策略的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2012.
- LI Huimin. Study on excitation control strategy for power system taking into random disturbance [D]. Jiling: Northeast Electric Power University, 2012.
- [17] 刘瑞叶, 于浩, 陈学允. 带自调整因子的模糊变结构汽门控制[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 27-34.
- LIU Ruiye, YU Hao, CHEN Xueyun. Fuzzy variable structure control for turbine valve with self-adjusting factor[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(7): 27-34.
- [18] 张丹, 王杰, 弥潇. 直流微电网自适应滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 138-143.
- ZHANG Dan, WANG Jie, MI Xiao. Adaptive sliding mode control strategy for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 138-143.

作者简介:



严彬彬

严彬彬(1992—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电技术 (E-mail: 1179738871@qq.com);

王宝华(1968—), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士, 通信作者, 研究方向为电力系统分析与非线性控制 (E-mail: wangbaohua@163.com)。

VSG control based on adaptive Terminal sliding-mode control method

YAN Binbin, WANG Baohua

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The low inertia and under-damping characteristics of the inverter-dominated distributed generation unit may impact the power system stability. Using the fourth-order synchronous generator model with the excitation and valve comprehensive control, a virtual synchronous generator control scheme based on adaptive Terminal sliding-mode control is designed. Two nonsingular Terminal sliding-mode functions are constructed based on the two input variables of the system. The convergence of the error is fast owing to the nonlinear Terminal sliding-mode function. As a consequence, the control effectiveness of the designed controller can be ensured. The simulative results show that the proposed control strategy can provide sufficient inertia and damping to guarantee the robustness of system in the presence of uncertain parameters and external disturbances, which can further suppress the system oscillation and improve the power system stability.

Key words: virtual synchronous generator; grid-connected inverter; Terminal sliding-mode control; stability; robustness