Electric Power Automation Equipment

虚拟调速器对VSG暂态功角稳定影响机理分析

张 巍¹,黄 文¹,帅智康¹,葛 俊¹,沈 超²,程慧婕¹,沈 霞¹ (1. 湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心,湖南 长沙 410082; 2. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:作为重要的一次调频环节,虚拟调速器(VG)对于大扰动下虚拟同步发电机(VSG)保持暂态功角稳定非常重要。以低通滤波(LPF)和高通滤波(HPF)型VG为研究对象,分别构建相应的VSG暂态大信号模型,采用扩展等面积定则分析考虑不同调速器时的VSG暂态功角稳定机理,并利用相图法量化研究VG控制参数对VSG暂态功角稳定的影响。研究发现,VG截止频率的减小会提高系统暂态功角稳定,LPF型VG增益的增加会增强系统暂态功角稳定,而HPF型VG增益的增加会造成系统暂态功角稳定先增强后减弱,且当VG的增益和截止频率相同时,LPF型VG比HPF型VG具有更大的系统暂态功角稳定裕度。仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词:虚拟同步发电机;虚拟调速器;暂态功角稳定;低通滤波;高通滤波

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI: 10.16081/j.epae.202206028

0 引言

为了应对能源危机和环境污染,大量新能源如 太阳能、风能通过电力电子变换器连接到电网中, 大幅降低了电网的惯性水平[1]。为了补偿系统的惯 性损失,虚拟同步发电机 VSG(Virtual Synchronous Generator)受到了广泛关注[2]。VSG由于其控制系 统中添加了转子运动回路、虚拟调速器 VG(Virtual Governor)回路、无功控制回路等环节,能模仿同步 发电机的输出特性,具有惯性支撑、频率调节和电压 控制的能力[3]。然而,与同步发电机类似,在大扰动 下由于输入机械功率与输出电磁功率的不平衡造成 加速面积大于减速面积,VSG也将面临严重的暂态 稳定性问题[4]。国内外学者对此开展了大量研究。 从暂态稳定分析方法来看,现有研究方法主要有5 种,即数值时域法[5]、李雅普诺夫能量函数法[6]、相 图法[7]、等面积法[8]和人工智能法[9-10]。从暂态稳定 性机理来看,很多学者致力于VSG的转子运动回 路[7,11-13]、无功控制回路[6,8]以及限流控制[14-16]等方面 的研究。文献[7]指出由于转子运动回路含有惯性 环节,即使存在平衡点也可能出现暂态不稳定的现 象。文献[11]详细分析 VSG 同步丢失的机理,并提 出一种暂态阻尼,避免文献[7]中暂态稳定和频率稳

收稿日期:2022-03-19;修回日期:2022-06-22

在线出版日期:2022-07-01

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(52125705);国家自然科学基金资助项目(51977066);中国博士后科学基金资助项目(2021M701136)

Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (52125705), the National Natural Science Foundation of China (51977066) and China Postdoctoral Science Foundation (2021M701136)

定的冲突。文献[12]提出一种模式自适应功角控制 方法,将转子运行回路在正反馈和负反馈间自适应 切换,提高了VSG暂态稳定,但忽略了阻尼影响,结 果偏保守。研究发现,单回路电压幅值控制对VSG 的暂态稳定性具有重要影响[13]。文献[6]指出无功 控制回路由于正反馈效应会恶化VSG变换器的暂 态稳定性。文献[8]指出不同的无功回路对 VSG 暂 态稳定性的影响程度不同。文献[14]发现电网故障 期间的电流饱和可能造成VSG控制瞬态不稳定。 文献[15]对含虚拟电阻的 VSG 暂态稳定进行分析, 得出虑拟电阻与电网电阻相反、恶化暂态稳定性的 结论。文献[16]揭示功率基准调整和暂态虚拟电阻 控制对暂态稳定性的影响。在上述文献中,暂态稳 定性被认为仅由转子运动回路、无功控制回路、限流 保护控制等决定。作为VSG重要组成部分之一的 VG,对有效调节输入机械功率起着至关重要的作 用,其参数不仅影响系统频率和并联功率的分配,而 且对 VSG 暂态功角稳定有重要影响,但 VG 对 VSG 暂态功角稳定的影响机理却少有研究。

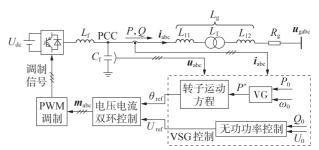
调速器作为一次调频环节,对于系统安全稳定运行起着重要作用。同步发电机中的调速器对稳定性的影响已被广泛研究[17]。研究发现,暂态功角不稳定可能是大扰动下由调速器引起的机械转矩和电磁转矩间的不平衡造成的[18]。相较于同步发电机,由于VSG具有更灵活的控制方式,因此可以通过合理设计VG的结构和参数使系统在大扰动下更容易达到暂态稳定。目前典型的VG主要包括高通滤波HPF(High-Pass Filter)型和低通滤波LPF(Low-Pass Filter)型2种[19:21]。文献[19]采用HPF型VG来对系统频率进行主动控制,但未考虑其对暂态稳定性的影响。文献[20]提出一种比例积分型VG模型。文

献[21]发现采用LPF型VG的VSG(简称为LPF-VG-VSG)来取代同步发电机可得到更好的稳定性能。 事实上,LPF型调速器与比例积分型调速器是等效 的[18]。从上述文献分析可知,由于VG的加入,VSG 的动态响应与同步发电机接近,有利于同步发电机 与VSG并联系统的稳定运行。但上述文献均仅对 加入VG后的系统进行建模以及对负荷功率变化下 的动态特性进行研究,而没有对动态特性的深层次 影响机理进行分析,也没有考虑大扰动下VG对VSG 暂态功角稳定的影响。文献[22]从 VSG 与同步发 电机并联的角度分析容易出现暂态功角失稳的原 因,即同步发电机和VSG的调速器差异,但没有对 不同类型VG下的系统暂态功角稳定进行深入分 析。为了提高暂态稳定性,文献[23]提出一种基于 HPF的暂态阻尼提升方法。文献[24]针对调速器模 块常被忽视的现状,从截止频率的角度研究基于 LPF的调速器模块对 VSG 大信号稳定性的影响,但 没有从带宽、增益等多维度进行综合分析。虽然已 有部分研究考虑了VG模块对VSG暂态功角稳定的 影响,但没有研究考虑不同VG对VSG暂态功角稳 定影响的机理,尤其是不同VG对VSG暂态稳定性 影响的共性和区别需进一步进行分析。

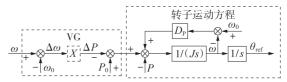
首先,本文对不同VG的VSG进行大信号建模,得到不同VG的VSG大信号降阶模型;其次,通过扩展等面积定则EEAC(Extended Equal Area Criterion)分析得到不同VG对VSG暂态功角稳定的影响机理;然后,利用相图分析方法进一步量化研究不同VG控制参数对VSG暂态功角稳定的影响程度,得出不同VG控制参数下的系统最优暂态功角稳定区间,并总结VG整体设计原则;最后,通过仿真证明本文理论分析的正确性。

1 采用不同 VG的 VSG 大信号模型

 定值; U_0 为 VSG 输出电压设定值; ω 为 VSG 虚拟角频率; $\Delta\omega$ 为 ω 与 ω_0 的差值;X为 LPF或 HPF型 VG 的传递函数; ΔP 为 VSG 输出功率调整值;J和 D_p 分别为 VSG 的虚拟惯性系数和虚拟阻尼系数; D_q 为无功下垂系数;s为拉普拉斯算子;PCC 为公共耦合点。



(a) VSG 拓扑与控制结构



(b)转子运动回路和VG回路

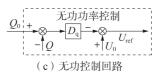


图1 VSG的拓扑结构和控制结构

Fig.1 Topological structure and control structure of VSG

VSG 控制主要由转子运动回路、无功控制回路和 VG 回路三部分组成。其中:转子运动回路和无功控制回路用于产生 VSG 的 θ_{ref} 和 U_{ref} ,共同构成 VSG 的内部输出电压; VG 回路主要是根据系统角频率差,通过 X 来调节 P^* ,如图 1 (b)和附录 A图 A1 所示。图 A1 中: G 为增益; ω_c 为截止角频率; P^*_{LPF} 和 P^*_{LPF} 分别为采用 LPF 和 HPF 型 VG 输出的参考有功功率。考虑到暂态稳定主要由功率控制回路和 VG 决定,本文采用快速动态的内部电压电流双环控制来保证 u_{abc} 准确跟踪 U_{ref} [6]。

根据图1(b),VSG转子运动方程为:

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = P^* - P - D_{\mathrm{P}}(\omega - \omega_0) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t} = \omega - \omega_{\mathrm{g}} \tag{2}$$

式中: δ 为 θ_{ref} 和电网电压相角 θ_{g} 之间的相角差,定义为功角; ω_{g} 为电网角频率,通常与 ω_{0} 相等。

根据图1(c),VSG无功功率控制为:

$$U_{\text{ref}} = U_0 + D_{\text{g}} (Q_0 - Q) \tag{3}$$

根据图1(b),VG表达式为:

$$P^* = P_0 - X(\omega - \omega_0) \tag{4}$$

根据附录A图A1,采用LPF和HPF型VG的表

1

达式分别为:

$$P_{\rm LPF}^* = P_0 - \frac{G}{s + \omega_0} \left(\omega - \omega_0 \right) \tag{5}$$

$$P_{\text{HPF}}^* = P_0 - \frac{Gs}{s + \omega_0} \left(\omega - \omega_0 \right) \tag{6}$$

结合式(1)—(3)、(5),可得到采用 LPF-VG-VSG 的控制表达式为:

$$\begin{cases} Js^2 \delta = P_0 - P - \left(\frac{G}{s + \omega_c} + D_p\right) s\delta \\ U_{ref} = U_0 + D_q \left(Q_0 - Q\right) \end{cases}$$
 (7)

结合式(1)—(3)、(6),可得到采用 HPF 型 VG 的 VSG(简称为 HPF-VG-VSG)的控制表达式为:

$$\begin{cases} Js^2 \delta = P_0 - P - \left(\frac{Gs}{s + \omega_c} + D_P\right) s \delta \\ U_{ref} = U_0 + D_q \left(Q_0 - Q\right) \end{cases}$$
(8)

将电网电压 \mathbf{u}_{gabe} 作为参考,同时假定 $\theta_{\text{g}}=0^{\circ}$,则 $\theta_{\text{ref}}=\delta^{[7]}$,因此,VSG 输出有功 P 和无功 Q 分别如式 (9)、(10) 所示。

$$P = 1.5 \frac{U_{\text{ref}} U_{g} X_{g} \sin \delta - (U_{\text{ref}} U_{g} \cos \delta - U_{\text{ref}}^{2}) R_{g}}{X_{g}^{2} + R_{g}^{2}}$$
(9)

$$Q = 1.5 \frac{-U_{\text{ref}} U_{\text{g}} R_{\text{g}} \sin \delta - \left(U_{\text{ref}} U_{\text{g}} \cos \delta - U_{\text{ref}}^{2}\right) X_{\text{g}}}{X_{\text{g}}^{2} + R_{\text{g}}^{2}}$$
(10)

式中: U, 为电网电压幅值; X, 为线路等效电抗。

可以发现,P和Q通过 δ 和 U_{ref} 相互耦合,将式(10)代入式(3),可推导出 $U_{ref}(\delta)$,再将其代入式(9)可得到考虑无功控制回路的P- δ 关系为:

$$P(\delta) = \frac{U_{g} \left[A + \sqrt{(A-1)^{2} + M} - 1 \right] \sin \delta}{2m_{1}D_{q}X_{g}}$$
(11)

$$A = 1.5D_a U_a (m_1 \cos \delta + m_2 \sin \delta) \tag{12}$$

$$M = 6m_1 D_a (U_0 + D_a Q_0)$$
 (13)

$$m_1 = \frac{X_{\rm g}}{X_{\rm g}^2 + R_{\rm g}^2} \tag{14}$$

$$m_2 = \frac{R_g}{X_g^2 + R_g^2} \tag{15}$$

通过式(11)可绘制出具有不同 L_g 和 R_g 的P- δ 曲线,如附录 A图 A2所示。可得出,当 L_g 较大或 R_g 较小时,由于允许变化的功角范围减小,因此不利于VSG暂态功角稳定。

由于 VSG 控制可以用电压源表示来研究其暂态特性,本文分别建立 LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 等效电路模型,如附录 A 图 A3 所示。

针对图 A3 中的 LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 等效电路模型,分别令 $x_3=G\delta s/(s+\omega_c)$ 和 $x_3=G\delta s^2/(s+\omega_c)$,假设 $\mathbf{x}=[x_1,x_2,x_3]^{\mathrm{T}}$,其中 $x_1=\delta$, $x_2=\omega-\omega_g=\dot{\delta}$,在忽略时间尺度较小的电压、电流内环等环节影响下,

2个等效电路模型的大信号降阶模型分别为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - \omega_g + \omega_0 \\ P_0 - P(x_1) - x_3 - D_p x_2 \\ J \\ -\omega_c x_3 + G x_2 \end{bmatrix}$$
 (16)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1} \\ \dot{x}_{2} \\ \dot{x}_{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2} - \omega_{g} + \omega_{0} \\ \frac{P_{0} - P(x_{1}) - x_{3} - D_{p} x_{2}}{J} \\ -\omega_{c} x_{3} + G \frac{P_{0} - P(x_{1}) - x_{3} - D_{p} x_{2}}{J} \end{bmatrix}$$
(17)

通过将式(16)和式(17)中的 \dot{x}_1 、 \dot{x}_2 和 \dot{x}_3 设置为 0,可得到大信号模型的稳定平衡点 x_e =[x_{1e} , x_{2e} , x_{3e}]^T, 其中 x_{1e} 、 x_{2e} 、 x_{3e} 分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 的稳定平衡数值,该稳定平衡数值不受 VG 控制参数的影响(VG 控制参数仅影响系统是否能够达到新的暂态稳定),有 x_{2e} =0、 x_{3e} =0、 $P(x_{1e})$ = P_0 ,因此平衡功角 δ_e 有2个值,即稳定平衡功角 δ_{e1} =0.558 6 rad 与不稳定平衡功角 δ_{e2} =2.4410 rad,如附录A图A4所示,暂态稳定的必要条件是发生大扰动后仍存在稳定平衡功角。本文重点研究在电网电压 U_g 从1.0 p.u.降到0.6 p.u.的情况下,2种VG对VSG 暂态功角稳定的影响。

2 考虑不同调速器时的 VSG 暂态功角稳定 机理

本节采用 EEAC 分别对 LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 的暂态功角稳定进行机理分析。

2.1 LPF型 VG对 VSG 暂态功角稳定的影响

由于本文主要考虑不同VG环节对VSG暂态稳定的影响,根据附录A图A3可知,LPF-VG-VSG和HPF-VG-VSG的动态特性均由增益G和截止频率 $\omega_c(J\pi D_p$ 不是本文的研究重点,相关分析见文献[7-8])决定。由于LPF-VG-VSG和HPF-VG-VSG等效电路模型与同步发电机的转子运动回路类似,考虑到 D_p 的存在,EEAC更适用于对系统暂态功角稳定的定性分析,可避免等面积定则(EAC)因未考虑阻尼而造成的判断极度保守的问题[8]。

根据式(7),令等值有功功率参考值 $P_n=P_0-$ [$G/(s+\omega_c)+D_P$] $s\delta$,则 LPF-VG-VSG 有功控制表达式为:

$$Js^2\delta = P_n - P \tag{18}$$

系统稳定性判据一般应满足:

$$\int_{\delta}^{\delta_{U}} (P_{n} - P) dt = A_{a} - A_{\text{dmax}} \leq 0$$
 (19)

式中: δ_0 为正常运行情况下的功角; δ_v 为故障下的不稳定功角; A_a 为加速面积; A_{draw} 为最大减速面积。

在电网电压 U_g 从 1.0 p.u. 降到 0.6 p.u. 的情况下,LPF-VG-VSG 功角曲线如图 2 所示。图中:曲线 I 为故障前的功角曲线,曲线 II 为故障时的功角曲

线; δ_F 、 δ_V 、 δ_B 分别为点F、V、B处的 δ 值;S均表示相应区域面积。由图可知,在故障发生时,运行点从点F跳变到点C,此时P< P_n ,随着故障持续,P增加, P_n 减少,处于加速阶段, δ 持续增加,直到P> P_n 时进入减速阶段,此时 δ 增速减慢。由式(18)可以看出,在加速和减速过程中,由于受到VG的增益G和截止频率 ω_c 的影响, P_n 是动态变化的,会出现不同的动态情况。

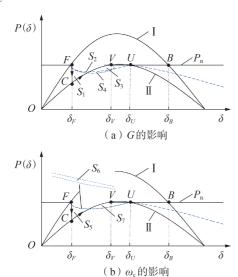


图 2 LPF-VG-VSG 功角曲线 Fig.2 Power angle curves of LPF-VG-VSG

当 $G = G_0(G_0 = 0)$ 时, $A_a = S_1$, $A_{dmax} = S_3$, $A_a \geqslant A_{dmax}$,造成 暂态过程功角超过 δ_U ,系统最终失去暂态稳定性,如图 2(a)中虚线所示,此时 A_{dmax} 与 A_a 非常接近;当 $G > G_0$ 时, $A_a = S_1 - S_2$, $A_{dmax} = S_3 + S_4$, $A_a < A_{dmax}$,系统在 δ_V 处保持暂态功角稳定,如图 2(a)中点划线所示。当 $\omega_c = \omega_{c0}(\omega_{c0} = 0.5 \text{ rad}/\text{s})$ 时, $A_a = S_5$, $A_{dmax} = S_7$, $A_a < A_{dmax}$,系统将保持暂态功角稳定,如图 2(b)中点划线所示;当 $\omega_c > \omega_{c0}$ 时, $A_a = S_5 + S_6$, $A_{dmax} = S_7$, $A_a > A_{dmax}$,系统失稳,如图 2(b)中虚线所示。综上所述,对于 LPF-VG-VSG而言,通过提高G可使加速面积减小,最大减速面积增加,有利于暂态功角稳定,而提高 ω_c 将相反,会恶化系统功角稳定性。

2.2 HPF型 VG对 VSG 暂态功角稳定的影响

HPF-VG-VSG 功角曲线如图 3 所示。当 $G=G_0$ 时,与 2.1 节分析相同,如图 3(a)中点划线所示;当 $G_0 < G < G_1$ (G_1 为某一临界值)时, $A_a = S_1 - S_8$, $A_{dmax} = S_3 - S_{10} + S_9$, $A_a < A_{dmax}$,系统将保持暂态功角稳定,如图 3(a)中实线所示;当 $G > G_1$ 时, $G = G_1$ 时, $G = G_2$ 0时, $G = G_3$ 0中虚线所示。当 $G = G_4$ 0时, $G = G_4$ 0时,G = G

保证系统暂态功角稳定,但当超过某一临界值 G_1 后,系统将不再稳定,而提高 ω_c 仍将会恶化系统稳定性。

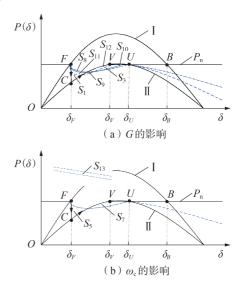


图 3 HPF-VG-VSG 功角曲线 Fig.3 Power angle curves of HPF-VG-VSG

3 VG 控制参数对 VSG 暂态功角稳定影响程 度量化研究

上文的机理分析分别得到了2种VG对VSG暂态功角稳定的影响规律,本节基于该规律进一步量化研究关键控制参数对VSG暂态功角稳定的影响。采用相图分析方法,通过 δ - $\Delta\omega$ 平面图对比研究不同控制参数(VG增益和截止频率)对LPF-VG-VSG和HPF-VG-VSG暂态功角稳定的影响。

3.1 VG增益 G对 VSG 暂态功角稳定的影响

为了研究不同 VG 增益 G 对暂态功角稳定的影响,本文使用附录 A 表 A1 中的参数(参数 G 除外),分别利用式(16)和式(17)绘制 δ - $\Delta \omega$ 平面图,如图 4 所示,可以直观地观察电压降落等大扰动下的动态响应。当 $\dot{\delta}$ > 0 时, δ 增大;当 $\dot{\delta}$ < 0 时, δ 减少。如果 $\dot{\delta}$ 在不稳定平衡点 U (此时对应的平衡点为V)之前降到 0,则 δ 将收敛到新的稳定平衡点,否则将出现发散现象,导致暂态功角不稳定,如 G = 0 (即不采用 VG 环节或 VG 环节失效)时,虽然此时存在平衡点,但仍可能导致暂态失稳。

当增益 G=2 p.u.时, HPF-VG-VSG 中 δ 超过不稳定平衡点 U处的值, 出现了失稳现象, 而 LPF-VG-VSG 能保证暂态功角稳定, 稳定平衡点为 $(1.3025 \, \mathrm{rad}, 0)$ 。本文将功角超调表示为 $\sigma_{\delta_{i,x}} = (\delta_{\mathrm{mi}} - \delta_{\mathrm{e}})/\delta_{\mathrm{e}} (i=1,2,3,4; x=\mathrm{L},\mathrm{H})$,其中 δ_{mi} 为对应的最大功角,将角频率差最大值表示为 $\max \Delta \omega_{i,x} = \Delta \omega_{\mathrm{mi}} - \Delta \omega_{\mathrm{e}} (i=1,2,3,4; x=\mathrm{L},\mathrm{H})$,其中 $\Delta \omega_{\mathrm{mi}}$ 和 $\Delta \omega_{\mathrm{e}}$ 分别为对应的暂态角频率最大偏差和稳态角频率偏差, $\Delta \omega_{\mathrm{e}} = 0$ 。对于 LPF-



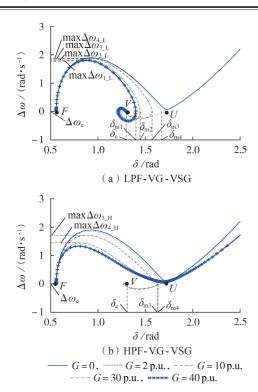


图 4 当电网电压降到 0.6 p.u. 时不同增益 G 下的 δ - $\Delta\omega$ 曲线

Fig.4 δ - $\Delta\omega$ curves under different values of gain G when grid voltage drops to 0.6 p.u.

VG-VSG, $\sigma_{84_{LL}} = (1.6643 - 1.3025) / 1.3025 \approx 27.78\%$, $\max \Delta \omega_{4L}$ =1.91 rad / s。 当增益 G =10 p.u. 时, LPF-VG-VSG、HPF-VG-VSG均能保证系统暂态稳定, 但 动 态 特 性 不 同,对于 LPF-VG-VSG, max $\Delta\omega_{3,1}$ = 1.868 6 rad/s, σ_{83} L≈ 20.67 %, 而对于 HPF-VG-VSG, σ_{δ3 H}≈24.58 %, max Δω_{3 H}=1.738 0 rad / s, 稳定平衡 点均与增益 G=2 p.u. 时的相同。此时 LPF-VG-VSG 具有最低的超调特性,展现出更大的暂态功角稳 定裕度,同时与HPF-VG-VSG具有相似的角频率差 最大值,因此,在这种情况下,LPF-VG-VSG在暂态 稳定性方面具有优势。当增益G=30 p.u.,发生电网 电压降落时,LPF-VG-VSG、HPF-VG-VSG的稳定平 衡点与上述情况相同。LPF-VG-VSG具有较小的功 角超调,σ_{ε2 L}≈11.07%,而HPF-VG-VSG具有更大的 功角超调,σ_{εν H}≈25.76 %,因此,LPF-VG-VSG在暂态 功角稳定裕度方面优于HPF-VG-VSG。当增益G=40 p.u. 时, HPF-VG-VSG 出现暂态失稳, 而 LPF-VG-VSG仍然可稳定到稳定平衡点,此时LPF-VG-VSG的 功角超调 $\sigma_{\delta 1,1} \approx 7.49\%$,角频率差最大值 max $\Delta \omega_{1,1} =$ 1.786 rad / s。总体而言, LPF-VG-VSG 的暂态功角 稳定优于HPF-VG-VSG。

由图 4(a)可知,随着增益 G的增大,LPF-VG-VSG的功角超调和角频率差最大值减小,暂态功角 稳定裕度增大,系统暂态稳定性加强。由附录 A图 A5(a)知,增益 G对 HPF-VG-VSG 的量化影响过程具体分为4个阶段。第一阶段中 G在[1,2] p.u. 区间内增加,由于运行点超过不稳定平衡点,此时系统一直失稳,如图 A5(b)所示;第二阶段中 G在[3,20] p.u. 区间内增加,系统维持暂态功角稳定,且其功角超调和角频率差最大值明显减小,如图 A5(c)所示;第三阶段中 G在[21,35] p.u. 区间内增加,此时系统仍可维持暂态功角稳定,且角频率差最大值仍然减小,但功角超调反向增加,系统暂态功角稳定不断减弱,如图 A5(d)所示;第四阶段中 G在[36,50] p.u. 区间内增加,由于运行点再次超过不稳定平衡点,此时系统失稳,临界值 G_1 =36 p.u.,如附录 A图 A5(e)所示。不同增益 G对 VSG 暂态功角稳定的影响如附录 A表 A2 所示。由表可知,G增大有利于 LPF-VG-VSG 的暂态功角稳定,但容易导致 HPF-VG-VSG 失稳。

3.2 VG截止频率ω。对 VSG 暂态功角稳定的影响

不同截止频率 ω_c 也会对 VSG 暂态功角稳定产生影响。本文使用附录 A 表 A1中的参数(参数 ω_c 除外),分别利用式(16)和式(17)绘制 δ - $\Delta\omega$ 平面图,如图 5 所示。由图可知:随着 ω_c 增大,系统暂态功角稳定裕度减小,甚至出现失稳现象;随着 ω_c 增大,系统轨迹向右移动,功角超调量变大,不利于暂态功角稳定,并在 ω_c 达到 4.5 rad/s时出现功角失稳,虽然在 ω_c 增大时 LPF-VG-VSG、HPF-VG-VSG 具有共性,但是其动态特性仍然不同。

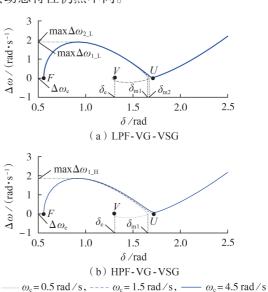


图 5 当电网电压降到 0.6 p.u. 时不同截止频率 ω_c 下的 δ - $\Delta\omega$ 曲线

Fig.5 δ - $\Delta\omega$ curves under different values of cutoff frequency ω_c when grid voltage drops to 0.6 p.u.

当 ω_c =0.5 rad / s 时, LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 均暂态功角稳定但存在差异,对于 LPF-VG-VSG, $\sigma_{\delta 1.L} \approx 26.60$ %,max $\Delta \omega_{1.L} = 1.915$ rad / s,而对于

HPF-VG-VSG, $\sigma_{\mathfrak{sl}_{-H}}\approx$ 26.68 %,max $\Delta\omega_{\mathfrak{l}_{-H}}=$ 1.868 rad/s, 在这种情况下,LPF-VG-VSG 的暂态功角稳定更优。 当 $\omega_{\mathfrak{e}}=$ 1.5 rad/s 时,HPF-VG-VSG 失去稳定性,而 LPF-VG-VSG 仍然维持暂态稳定,此时 LPF-VG-VSG 的 $\sigma_{\mathfrak{sl}_{-L}}$ 增加到 28.980 %,而 max $\Delta\omega_{\mathfrak{l}_{-L}}$ 几乎不变。当 $\omega_{\mathfrak{e}}=$ 4.5 rad/s 时,LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 均失去暂态功角稳定。

不同截止频率 ω 。下系统暂态功角稳定的比较如附录A表A3所示。由表可知,随着 ω 。增加,LPF-VG-VSG和HPF-VG-VSG的暂态功角稳定均下降,且HPF-VG-VSG最先失稳。

3.3 VG控制参数对VSG暂态功角稳定的整体影响

通过 3.1 节和 3.2 节的分析可知,增益 G 和截止 频率 ω_c 的合理设置对提高系统暂态功角稳定具有 重要意义。为了量化 VG 控制参数对 LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 暂态功角稳定的整体影响,本文综合考虑准确性和计算机计算负担,将 G 和 ω_c 的计算 步长分别设置为 1 p.u.和 0.05 rad / s,对于每个指定的截止频率 ω_c ,利用附录 B图 B1 所示流程得到系统 暂态功角稳定下的增益 G,重复该流程可得到当电 网电压降到 0.6 p.u.时,在 G 和 ω_c 共同作用下系统暂态功角稳定的整体影响区域,如附录 B图 B2 所示,图中蓝色区域为暂态功角稳定区域,白色区域为暂态功角不稳定区域。

由图B2(a)知,对于LPF-VG-VSG: 当ω_c<1.2 rad/s 时,无论G在 $(0,+\infty)$ 区间内取何值,均能保持系统 暂态功角稳定,此时系统暂态稳定裕度最大;当 ω 。 在[1.2,3.4] rad / s区间内取值时,若 G≥2 p.u.,则系 统暂态功角稳定,否则将出现暂态失稳,可见系统暂 态稳定裕度减小; 当 ω_c >3.4 rad / s 时, G超过 3 p.u. 才能保证系统暂态功角稳定,此时系统暂态稳定裕 度最小。由图B2(b)可知,对于HPF-VG-VSG:只有 当 ω _s≤2.1 rad / s 时,才有可能保持系统暂态功角稳 定,否则无论G在 $(0,+\infty)$ 区间内取何值,系统均会 失稳;随着 ω 。取值减小,系统维持暂态功角稳定的G取值范围增大,此时系统暂态稳定裕度增大,如在 ω_{s} ≤0.5 rad / s 时, G 可在[1 p.u., +∞)区间内取任何 值,此时系统暂态功角稳定裕度最大。综上可知,在 VG控制参数的联合影响下,LPF-VG-VSG的暂态功 角稳定区域面积(暂态功角稳定裕度)明显比HPF-VG-VSG的大,因此在相同的控制参数条件下,在维 持系统暂态功角稳定方面, LPF-VG-VSG 比 HPF-VG-VSG更有优势。

3.4 VG整体设计指导原则

根据前面的结论,可以总结出VG的设计指导原则如下。

首先,在控制参数相同的情况下,工程技术人员应当优先选择LPF型VG,其在维持系统暂态功角稳

定方面具有较大的稳定裕度。

然后,为了使得LPF型VG具有更好的系统暂态功角稳定,根据附录B图B2(a),应当优先选择较小的截止频率,同时增益具有较大的选择自由度,此时系统暂态稳定裕度最大,不易失稳。如在采用附录A表A1的系统参数(除增益G和截止频率 ω 。外)时,为了获得最大的稳定裕度,LPF型VG的截止频率取值小于1.2 rad/s。

最后,对于某些负荷波动剧烈的地区,出于快速恢复频率稳定的需要,往往采用 HPF型 VG,根据附录 B图 B2(b),应当选择较小的截止频率,以维持故障时的系统暂态功角稳定,但是此时增益并无 LPF型 VG中增益所具有的较大的选择自由度,而是只能在一个区间范围内进行选择。如在采用附录 A表 A1的系统参数(除增益 G 和截止频率 ω 。外)时,为了获得相对较大的稳定裕度,HPF型 VG的截止频率可选取 1.5 rad / s,增益选择的区间范围为 [3,35] p.u.,根据附录 A表 A2,增益可优先选取 20 p.u.。

4 仿真验证与分析

为了验证理论分析的正确性,在MATLAB/Simulink中建立图 1(a)所示的仿真模型,系统参数如附录A表A1所示。运行工况为:t=5 s时电网发生三相接地短路故障,假设此时电网电压 U_s 降至额定电压的 60%。为了对比 LPF-VG-VSG 和 HPF-VG-VSG 的暂态功角稳定,对不同控制参数下的系统暂态功角稳定进行仿真分析,不同控制参数的设置如表 1 所示,表中 G 为标幺值。仿真结果如附录 C 图 C1-C5 所示。

表1 5种情况下的控制参数设置

Table 1 Control parameter setting for five cases

情况	G	$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{c}} / (\mathrm{rad} \cdot \mathrm{s}^{-1})$
1	2	1.5
2	10	1.5
3	40	1.5
4	2	0.5
5	2	4.5

控制参数 ω_c 变化下 HPF-VG-VSG 和 LPF-VG-VSG 暂态功角稳定的仿真实验控制参数设置如表 1 中的情况 1、4、5 所示,仿真结果如附录 C 图 C1、C4、C5 所示。情况 4 下,此时 ω_c 在 [0.5,1.1] rad / s 区间内,当电网电压降到 0.6 p. u. 时,HPF-VG-VSG 和 LPF-VG-VSG 均可保证系统暂态功角稳定,此时HPF和LPF型 VG下的 $\max \Delta \omega$ 分别为 1.738 rad / s 和 1.915 rad / s, $\max \delta$ 分别为 1.6227 rad 和 1.649 0 rad,均非常接近,但是 HPF-VG-VSG 的系统短时振荡时间较长,因而造成系统保持稳定的时间延后,这说明HPF-VG-VSG 在保证暂态稳定性方面不如 LPF-VG-VSG

VSG。情况1下,此时 ω_c 在[1.2,3.4] rad/s区间内,当电网电压降到0.6 p.u.时,出现了不同的暂态响应,HPF-VG-VSG的系统失稳,而LPF-VG-VSG系统暂态功角稳定,且 max δ 和 max $\Delta\omega$ 分别为1.6643 rad和1.910 rad/s,更加体现了LPF-VG-VSG在维持系统暂态功角稳定方面的优势。情况5下, ω_c 在(3.5 rad/s,+ ∞)区间内,此时LPF-VG-VSG的系统才失去暂态功角稳定,而HPF-VG-VSG的系统才失去暂态功角稳定,而HPF-VG-VSG的系统早已失稳。与第2节和第3节的分析一致,在不同参数 ω_c 下,LPF-VG-VSG比HPF-VG-VSG在维持系统暂态功角稳定方面具有优势。

对不同控制参数 G下 HPF-VG-VSG 以及 LPF-VG-VSG 的暂态功角稳定进行仿真分析,分别采用 情况1-3的控制参数进行对比,仿真结果如附录C 图 C1-C3 所示。情况 1 下,G 在 [1,2] p.u. 区间内, 与上文 ω_c 在[1.2,3.4] rad/s区间内的分析相同。 情况 2 下, G 在 [3,20] p.u. 区间内, 当电网电压降到 0.6 p.u. 时, HPF-VG-VSG和LPF-VG-VSG均可维持系 统暂态稳定,同时HPF型VG和LPF型VG下max Δω 分别为 1.7380 rad / s 和 1.8686 rad / s, max δ分别为 1.622 7 rad 和 1.571 7 rad, 均非常接近, 但 HPF-VG-VSG系统短时振荡时间较长,造成系统保持稳定的 时间延后,这说明LPF-VG-VSG在保证暂态稳定性 方面比HPF-VG-VSG具有明显优势。情况3下,G在 [36 p.u.,+∞)区间内, 当电网电压降到 0.6 p.u. 时, LPF-VG-VSG和HPF-VG-VSG出现不同的暂态行为, LPF-VG-VSG的系统仍可保证趋于暂态功角稳定, 但 HPF-VG-VSG 的系统则出现失稳。遵循 $\Delta\omega$ 和 δ 随 G 增大而减小的规律, LPF-VG-VSG 中 max $\Delta \omega$ 和 $\max \delta$ 分别为 1.7860 rad / s 和 1.4001 rad, 同时系统 在出现了小幅振荡现象后才趋于稳定。而对于 HPF-VG-VSG,P、 $\Delta \omega$ 、 δ 和电网电流 I_{σ} 曲线均发生振 荡,出现系统暂态失稳。与第2节和第3节的分析一 致,在不同参数 G下,LPF-VG-VSG 比 HPF-VG-VSG 在维持系统暂态功角稳定方面的效果更好。

通过以上分析可以得出:在维持系统暂态功角稳定方面,相同控制参数条件下LPF-VG-VSG比HPF-VG-VSG更具有优势,同时,不同控制参数的选择对LPF-VG-VSG维持暂态功角稳定起着关键作用。当电网电压降落到0.6 p.u.时不同控制参数下的仿真结果如图6所示。

由图 6 可知,当 ω_c =1.5 rad/s时,随着 G的不断增大,LPF-VG-VSG的系统暂态功角稳定得到增强,功角过冲和角频率偏差明显减小,暂态功角稳定裕度不断增大,有利于维持系统暂态功角稳定,与第 2 节和第 3 节的分析一致,同时振荡衰减明显减弱,且均能最终达到相同的稳定状态,这说明暂态过程中

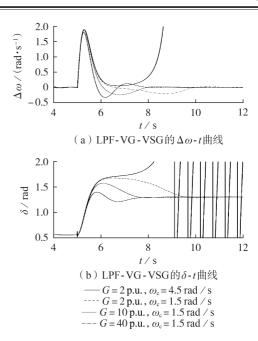


图 6 当电网电压降到 0.6 p.u. 时不同控制参数下的 仿真结果

Fig.6 Simulative results under different control parameters when grid voltage drops to 0.6 p.u.

通过 VG 仅增加了暂态阻尼,不会改变系统的稳定平衡点。当 G=2 p.u.、 $\omega_e=1.5$ rad/s时,系统可保持暂态功角稳定。当 G=2 p.u.、 $\omega_e=4.5$ rad/s时,LPF-VG-VSG 的系统暂态功角出现持续振荡现象,说明系统发生了暂态功角失稳。仿真结果与理论分析结果一致,验证了本文理论分析的正确性。

5 结论

本文以不同 VG 的 VSG 为研究对象,构建不同 VG 的大信号暂态模型,揭示不同 VG 的 VSG 暂态功角稳定影响机理,并进行仿真验证,得到以下结论。

- 1)VG控制参数对维持系统暂态功角稳定起着至关重要的作用。对于LPF-VG-VSG,VG增益的增加或截止频率的减小均能增强系统暂态功角稳定;而对于HPF-VG-VSG,VG增益的增加将造成系统暂态功角稳定先增强后减弱,而截止频率的减少会增强系统暂态功角稳定。
- 2) LPF-VG-VSG 的暂态功角稳定较 HPF-VG-VSG 更出色,当2种 VG 取相同的增益和截止频率时,LPF-VG-VSG 的暂态功角稳定裕度远大于 HPF-VG-VSG。
- 3)LPF-VG-VSG的暂态功角稳定裕度随着调速器增益G的增加而增大,随着调速器截止频率 ω 。的增大而减小。而HPF-VG-VSG的暂态功角稳定裕度随着G和 ω 。的增加大多呈现下降趋势,容易出现暂态功角失稳。
 - 4)本文提出的 VG 具体设计指导原则,可为今

后含VG的变换器暂态稳定性提升提供理论指导。

5)本文中VG对VSG暂态功角稳定影响的机理,是在假定转子控制回路、无功控制回路、限流控制回路等其他控制回路不影响VSG暂态功角稳定的前提下得出的,后续笔者将继续研究包括VG在内的多个控制回路共同作用对VSG暂态功角稳定的影响。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 帅智康,邹福筱,涂春鸣,等. 微网暂态稳定性研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(16):151-159.

 SHUAI Zhikang,ZOU Fuxiao,TU Chunming, et al. Review on transient stability of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(16):151-159.
- [2] 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.
- [3] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids
 [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):394-395.
- [4] 张宇,蔡旭,张琛,等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述 [J]. 中国电机工程学报,2021,41(5):1687-1702. ZHANG Yu,CAI Xu,ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(5):1687-1702.
- [5] SHUAI Z K, PENG Y L, LIU X, et al. Parameter stability region analysis of islanded microgrid based on bifurcation theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6580-6591.
- [6] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [7] PAN D H, WANG X F, LIU F C, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control; a designoriented study [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2):1019-1033.
- [8] ZHAO F, SHUAI Z K, HUANG W, et al. A unified model of voltage-controlled inverter for transient angle stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3):2275-2288.
- [9] 邬春明,任继红.基于人工智能的暂态稳定裕度精细化预测[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):108-114. WU Chunming, REN Jihong. Refined prediction of transient stability margin based on artificial intelligence[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):108-114.
- [10] SHEN Y, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient angle stability prediction of virtual synchronous generator using LSTM neural network [C] //2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Vancouver, Canada; IEEE, 2021; 3383-3387.
- [11] XIONG X L, WU C, HU B, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7):7820-7831.
- [12] WU H, WANG X F. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2):1034-1049.

- [13] LIU T, WANG X F. Transient stability of single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6):6158-6162.
- [14] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):578-591.
- [15] LIU T, WANG X F, LIU F C, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters during symmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4):4751-4763.
- [16] XIONG X L, WU C, BLAABJERG F. Effects of virtual resistance on transient stability of virtual synchronous generators under grid voltage sag[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5):4754-4764.
- [17] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE / CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1387-1401.
- [18] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-hill, 1994: 813-814.
- [19] YANG T, CUI H F, ZHANG L, et al. Active frequency support control of energy storage power station based on photovoltaic and energy-storage microgrid[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Chengdu, China: IEEE, 2019:2362-2367.
- [20] 赵杨阳,柴建云,孙旭东. 基于虚拟同步发电机的柔性虚拟调速器模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(10):8-15.

 ZHAO Yangyang, CHAI Jianyun, SUN Xudong. Flexible virtual governor model based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(10):8-15.
- [21] CHEN J R, LIU M Y, O'DONNELL T. Replacement of synchronous generator by virtual synchronous generator in the conventional power system [C] //2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Atlanta, USA; IEEE, 2019; 1-5.
- [22] CHENG H J, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics.2020.35(8):8751-8765.
- [23] XIONG X L, WU C, CHENG P, et al. An optimal damping design of virtual synchronous generators for transient stability enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(10):11026-11030.
- [24] SHEIR A, SOOD V K. Effect of low pass filter in governor model of virtual synchronous generator [C]//2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Chicago, USA; IEEE, 2021;1-7.

作者简介:



张 巍(1987—),男,博士研究生,研究方向为新能源并网控制和徽电网暂态控制(E-mail;zwei0105@hnu.edu.cn);

黄 文(1991—),男,博士,通信作者, 研究方向为并网逆变器控制技术、微电网 稳定性分析等(E-mail: huangwen@hnu.edu. cn);

论、微电网的稳定性分析及控制、电力电子技术及应用等。

(编辑 王锦秀)

(下转第71页 continued on page 71)



Distributed reactive power-voltage secondary control strategy of independent virtual synchronization technology-based microgrid

WU Ming¹, LÜ Zhenyu², SONG Zhenhao¹, LÜ Zhipeng¹, XIONG Xiong¹ (1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In view of the primary regulation characteristics of reactive power-voltage control in independent virtual synchronization technology-based microgrid, based on the virtual synchronous control technology, a distributed reactive power-voltage secondary control strategy taking into account the remaining reactive power capacity of virtual synchronous converter is proposed for independent microgrid. In order to improve the utilization rate of reactive power capacity and average voltage level of the system, the evaluation of system's average reactive power unit value and average port voltage value is implemented through distributed sparse communication between adjacent virtual synchronous machine controllers. On this basis, the optimal reference values of reactive power-voltage droop parameters for the virtual synchronous converter are obtained through the proposed distributed secondary controller, so as to realize the optimal allocation of reactive power and voltage regulation, and improve the power quality while improving the utilization rate of reactive power capacity of the system. An independent virtual synchronization technology-based microgrid model is built based on MATLAB / Simulink, and the effectiveness of the proposed strategy and its superiority compared with the traditional reactive power-voltage regulation strategy are verified by simulation.

Key words: independent microgrid; virtual synchronous machine; reactive power-voltage characteristics; distributed control; remaining reactive power capacity; average voltage

(上接第62页 continued from page 62)

Impact mechanism analysis of virtual governor on transient power angle stability of VSG

ZHANG Wei¹, HUANG Wen¹, SHUAI Zhikang¹, GE Jun¹, SHEN Chao², CHENG Huijie¹, SHEN Xia¹
(1. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center,
Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As an important part of primary frequency regulation, VG(Virtual Governor) is extremely important for VSG(Virtual Synchronous Generator) to maintain transient power angle stability under large disturbances. The LPF(Low-Pass Filter) and HPF(High-Pass Filter) type VGs are taken for research objects, the corresponding VSG transient large signal models are built. The extended equal area criterion is adopted to analyze VSG transient power angle stability mechanism considering different governors, and the phase portrait method is used to quantitatively research the impact of VG control parameters on VSG transient power angle stability. It is found that decreasing the cut-off frequency of VG will improve the system transient power angle stability, increasing the gain of LPF type VG will strengthen the system transient power angle stability, while increasing the gain of HPF type VG will cause the system transient power angle stability strengthen first and then weaken. When the gain and cut-off frequency of VG are the same, LPF type VG has a larger margin of system transient power angle stability than that of HPF type VG. The correctness of theoretical analysis is verified by the simulative results.

Key words: virtual synchronous generator; virtual governor; transient power angle stability; low-pass filter; high-pass filter

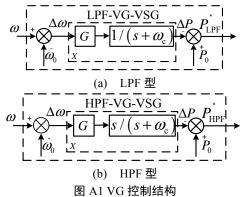
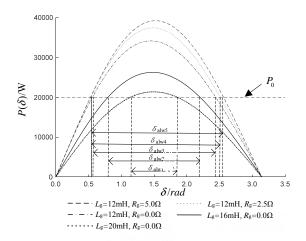
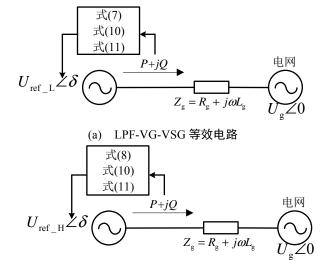


Fig.A1 Control structure of VG



注: $\delta_{\text{abv}k}$ $(k=1,2,\cdots,5)$ 为允许变化的功角范围。 图 A2 不同 R_{g} 和 L_{g} 的 $P-\delta$ 曲线

Fig.A2 $P-\delta$ curves with different values of R_g and L_g



(b) HPF-VG-VSG 等效电路

注: $U_{\text{ref_L}}$ 为 LPF-VG-VSG 的输出电压幅值; $U_{\text{ref_H}}$ 为 HPF-VG-VSG 的输出电压幅值。

图 A3 VSG 等效电路

Fig.A3 Equivalent circuit of VSG

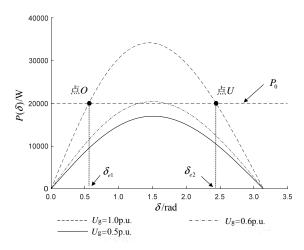


图 A4 不同电网电压降下 $P-\delta$ 曲线

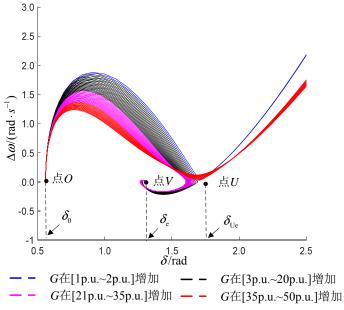
Fig.A4 $P-\delta$ curves with different grid voltage sags

表 A1 系统参数

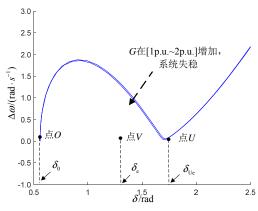
Table A1 Parameters of the system

rable At Talameters of the system			
参数	描述	取值	
$\omega_{\scriptscriptstyle 0}$	系统角频率设定值	314.16 rad	
$\omega_{\scriptscriptstyle m g}$	电网角频率	314.16 rad	
P_0	有功功率设定值	20 kW	
$P_{ m max}$	有功功率最大值	20 kW	
Q_0	无功功率设定值	0	
$Q_{ m max}$	无功功率最大值	25 kvar	
$U_{ m g}$	电网电压幅值	311 V	
U_{0}	VSG 输出电压设定值	311 V	
$R_{ m g}$	线路电阻	0.03	
$L_{ m g}$	线路等效电感	0.78	
$\stackrel{\circ}{J}$	虚拟惯性	$10P_{\mathrm{max}}\omega_{0}$	
$D_{\scriptscriptstyle m P}$	阻尼系数	$25P_{\max}\omega_0$	
D_q	无功下垂系数	$0.1 U_0 Q_{\mathrm{max}}$	
G	增益	$2P_{\max}\omega_0$	
$\omega_{\rm c}$	截止角频率	1.5 rad/s	
$U_{ m dc}$	直流侧电压	800 V	

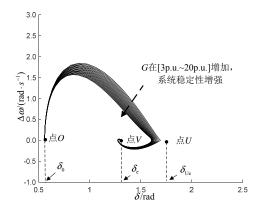
注: $R_{\rm g}$ 、 $L_{\rm g}$ 为标幺值。



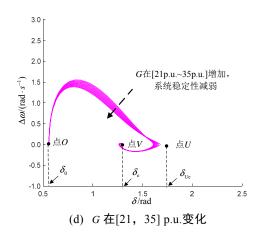
(a) G 在[1, 50] p.u.变化下 δ - $\Delta\omega$ 曲线



(b) G在[1, 2] p.u.变化



(c) G在[3, 20] p.u.变化



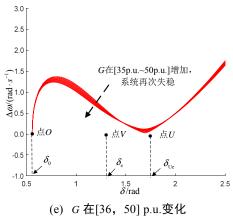


图 A5 当电网电压降落到 0.6 p.u.时不同增益 G 下的 $\delta-\Delta\omega$ 曲线 Fig.A5 $\delta-\Delta\omega$ curves under different values of gain G when grid voltage drops to 0.6 p.u.

表 A2 不同增益 G 对 VSG 暂态功角稳定的影响 Table A2 Impact of different values of gain G on transient

angle stability of VSG

\overline{G}	LPF-VG-VSG	HPF-VG-VSG
[0, 1]	失稳	失稳
(1, 2]↑	↑	失稳
[3, 20]↑	↑	↑
[21, 35]↑	↑	\downarrow
[36, +∞)↑	↑	失稳

注: G 为标幺值; ↑表示增加,↓表示减少,后同。

表 A3 不同截止频率 ω 对 VSG 暂态功角稳定的影响

Table A3 Impact of different values of cutoff frequency ω_c on

transient angle stability of VSG

$\omega_{\rm c}$ / (rad•s ⁻¹)	LPF-VG-VSG	HPF-VG-VSG
[0.5, 1.1] ↑	↓	↓
[1.2, 3.4]↑	↓	失稳
[3.5, +∞)↑	失稳	失稳

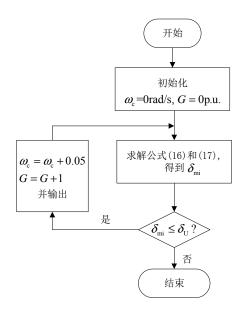
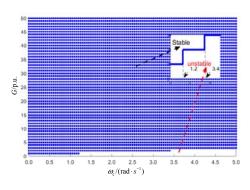
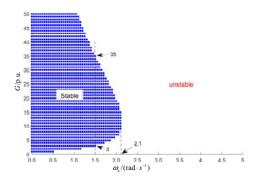


图 B1 系统暂态功角稳定区域计算流程图

Fig.B1 Calculation flowchart of system transient angle stability area



(a) LPF-VG-VSG



(b) HPF-VG-VSG

图 B2 当电网电压降落到 0.6 p.u.时 G 和 G 共同作用下系统暂态功角稳定的整体影响区域

Fig.B2 Overall influence region of system transient angle stability under joint impact of G and ω_c when grid voltage drops to 0.6 p.u.

附录 C

情况 1: G = 2.0 p.u., $\omega_c = 1.5$ rad/s

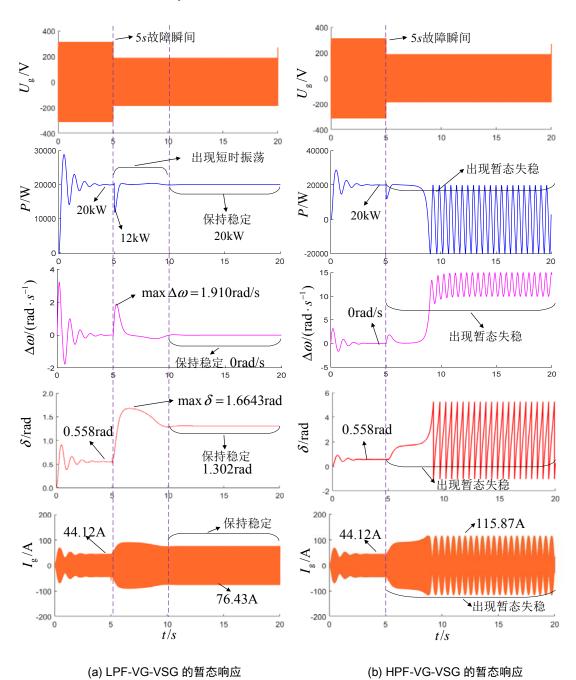
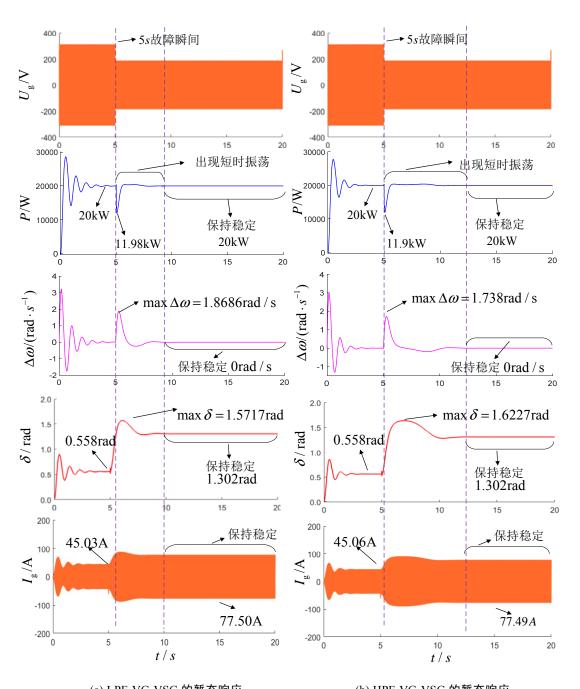
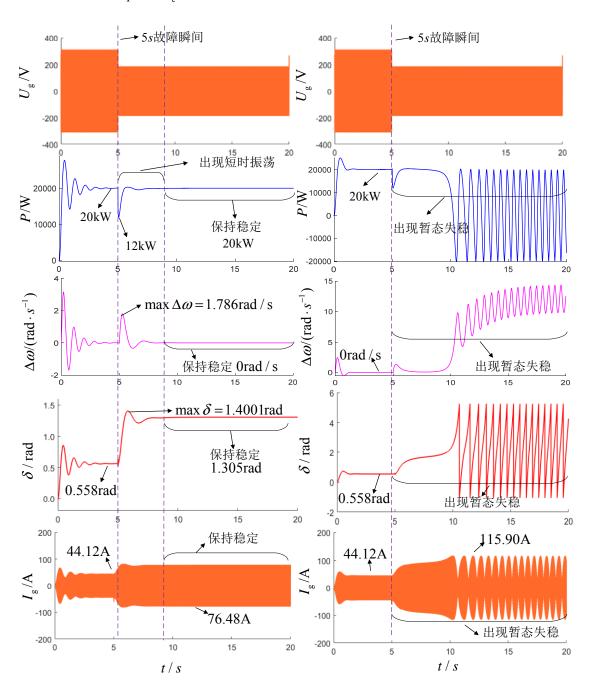


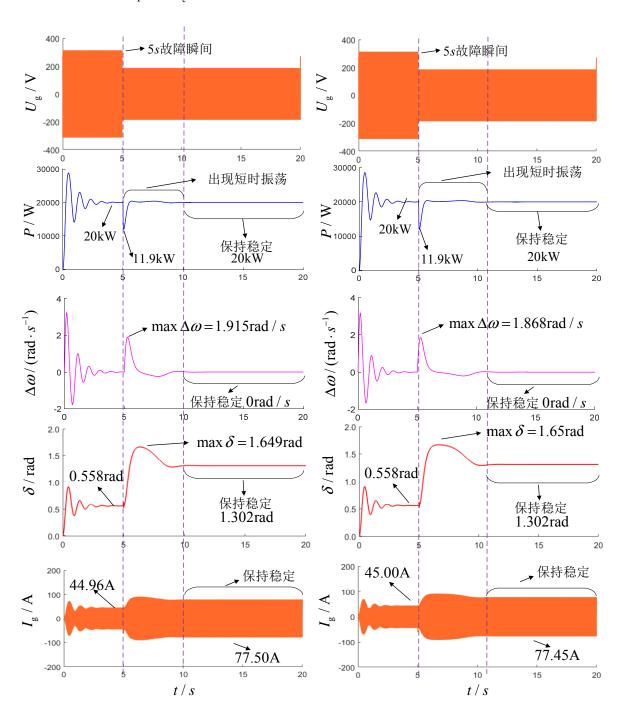
图 C1 情况 1 下当电网电压降落到 0.6 p.u.时的系统暂态响应 Fig.C1 System transient response when grid voltage drops to 0.6 p.u. under Case 1



(a) LPF-VG-VSG 的暂态响应 图 C2 情况 2 下当电网电压降落到 0.6 p.u.时的系统暂态响应 Fig.C2 System transient response when grid voltage drops to 0.6 p.u. under Case 2



(a) LPF-VG-VSG 的暂态响应 图 C3 情况 3 下当电网电压降落到 0.6 p.u.时的系统暂态响应 Fig.C3 System transient response when grid voltage drops to 0.6 p.u. under Case 3



(a) LPF-VG-VSG 的暂态响应 图 C4 情况 4 下当电网电压降落到 0.6 p.u.时的系统暂态响应 Fig.C4 System transient response when grid voltage drops to 0.6 p.u. under Case 4

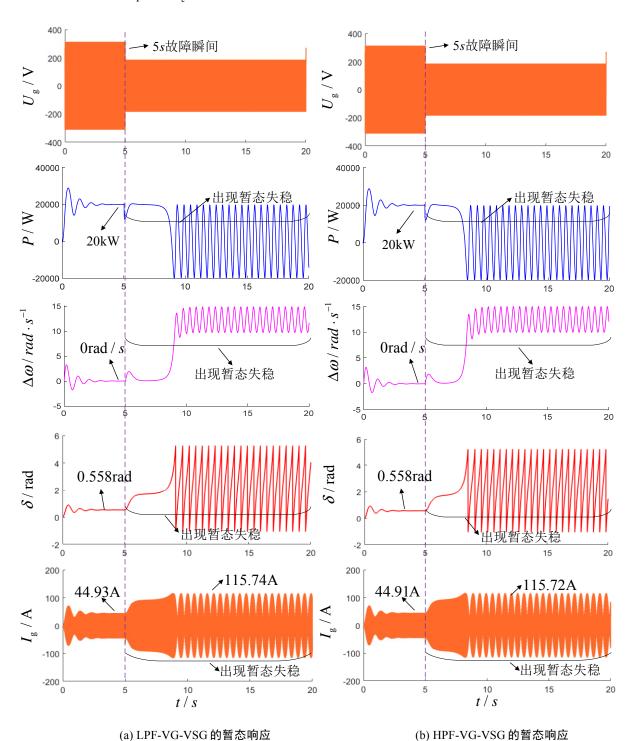


图 C5 情况 5 下当电网电压降落到 0.6 p.u.时的系统暂态响应 Fig.C5 System transient responses when grid voltage drops to 0.6 p.u. under Case 5