第 50 卷 第 1 期：138-149 高电压技术 Vol.50, No.1: 138-149
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231472

基于超前滞后环节附加前馈阻尼的 VSG 控制策略

兰　飞，高占兴，黎静华
（广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学)，南宁 530004）

摘　要：虚拟同步发电机（virtual synchronous generator，VSG）在引入同步机二阶转子运动方程，增大电力系统等效惯量的同时，也引入了同步发电机的振荡特性，有功低频振荡等动态稳定性问题也随之而来。引入调速侧电力系统稳定器（governor power system stabilizer，GPSS）能有效抑制 VSG 的功率低频振荡，但其在超调量及调节时间方面的控制效果仍有待提高。通过建立 VSG 的小信号模型从极点配置角度分析其稳定性，揭示基于 GPSS 的 VSG 控制策略在功率动态响应上存在较高超调和较长调节时间的原因。基于此，参考 GPSS 控制思想，提出了一种基于超前滞后环节附加前馈阻尼补偿的虚拟同步发电机控制策略。并从理论上分析验证了所提控制策略在不影响系统稳态特性的前提下，能够提供调整自由度更高的正阻尼，在有效地抑制功率超调的同时提高了系统的调节速度，从而更好地抑制了有功功率的低频振荡。最后通过 MATLAB/Simulink 进行对比仿真，仿真结果与理论分析结果一致，证明了所提控制策略的正确性和有效性。

关键词：虚拟同步发电机；前馈阻尼补偿；小信号模型；动态性能；有功低频振荡

VSG Control Strategy Based on Additional Feedforward Damping of Leading and Lagging Links

LAN Fei, GAO Zhanxing, LI Jinghua
(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy-saving Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) not only introduces the second-order rotor motion equation of the synchronous machine to increase the equivalent inertia of the power system, but also introduces the oscillation characteristics of the synchronous generator, leading to dynamic stability issues such as active low-frequency oscillation. The introduction of a governor power system stabilizer (GPSS) can effectively suppress the low-frequency oscillation of VSG power, but its control effect in terms of overshoot and regulation time still needs to be improved. By establishing a small signal model of VSG and analyzing its stability from the perspective of pole configuration, it is revealed that the VSG control strategy based on GPSS has high overshoot and long adjustment time in power dynamic response. Thereby, referring to the GPSS control concept, a virtual synchronous generator control strategy based on additional feed-forward damping compensation with leading and lagging links is proposed. And it is theoretically analyzed and verified that the proposed control strategy can provide positive damping with higher degrees of adjustment freedom without affecting the steady-state characteristics of the system, effectively suppressing the power overshoot while improving the system's adjustment speed, thereby better suppressing low-frequency oscillation of active power. Finally, comparative simulation was conducted using MATLAB/Simulink, and the simulation results were consistent with the theoretical analysis results, proving the correctness and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: virtual synchronous generator; feed forward damping compensation; small-signal model; dynamic performance; active low-frequency oscillation

0　引言

随着新能源发电技术的不断发展，大量的电力电子设备融入传统的电力系统中，分布式能源如光伏、风电、储能等得到了广泛的关注[1-2]。逆变器作为分布式电源的并网接口，具有控制灵活、响应迅速等优点，但其惯性小以及阻尼低等缺点，无法适应风电、光伏等分布式能源的波动性，影响系统的稳定性[3-4]。为了消除可再生能源对电力系统稳定运行的威胁，虚拟同步发电机（virtual synchronous

基金资助项目：国家自然科学基金(52367004)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52367004).

generator，VSG）及相应的控制策略应运而生。VSG 模拟了传统同步发电机（synchronous generator，SG）的转子运动特性，使其能够为系统提供一定的惯性和阻尼，从而改善系统频率和电压的稳定性，具有非常广阔的应用前景[5-6]。

然而，VSG 引入虚拟惯量的同时，也使得系统有功控制部分具有二阶的振荡特性，这就导致了当电网出现扰动时，VSG 会发生功率振荡。过流能力弱、阻尼小的逆变器，常会在这种工况下崩溃，不利于系统的稳定。与 SG 相比，VSG 具有转动惯量及阻尼参数灵活可调、不受物理性质约束等优点，可以通过调整参数改善系统性能，但其参数的调节具有矛盾性，不能达到一致性改善系统动态响应的目标[7-8]。文献[8]据此提出了 VSG 参数自适应控制策略，通过分析扰动后功率振荡特性和功角变化自动地调整系统参数值，有效地改善了功率的振荡问题。但是相关系数的选取较为复杂，且系数的频繁调整可能会诱发新的振荡，影响系统的稳定性。为了在引入惯性的同时增加 VSG 阻尼，且不影响系统调节速度，文献[9]在原有的功率控制基础上叠加角频率偏差补偿，实现了动态性能的改善，但没有讨论阻尼系数整定及其对系统动态性能的影响。

针对 VSG 有功低频振荡问题，文献[10-15]通过重新设计控制结构，在系统原有基础上附加部分反馈控制环节，进而提供了额外的零点和极点，通过调整附加环节的参数，能够改变系统额外零极点的位置，从而改善系统的动态特性。然而，经文献[16-17]论证，这种反馈控制会不可避免地影响系统初始惯性响应，导致系统的频率响应不能受到惯性的限制，具有较大的频率过冲，造成惯性响应的退化，严重影响系统频率的稳定性。

电力系统稳定器(power system stabilizer，PSS)因为能够有效解决电力系统中存在的低频振荡问题得到了广泛的应用。文献[18]提出了改进方案以提高大规模风力发电电力系统的小信号稳定性，并指出 PSS 在应对分布式电源的随机波动时可能不会达到预期的性能。文献[19]进一步将 PSS 引入 VSG 控制策略，抵消励磁部分造成的负阻尼同时为系统提供正阻尼转矩，有效抑制了功率振荡，但存在较大的超调。文献[20]提出了一种虚拟 PSS 控制策略，以增加并联系统的小信号稳定性，但未对较大的功率超调量进行理论分析。文献[21]提出了虚拟阻抗控制和一种励磁侧 PSS 控制装置的设计方法，以虚拟励磁调节器为控制对象，增加了系统正阻尼从而抑制了功率振荡，但系统调整时间相对较长。文献[22]提出了一种基于调速侧电力系统稳定器(power system stabilizer on governors，GPSS)的 VSG 控制策略，与励磁侧 PSS 相比，可以更有效地抑制低频振荡。目前，PSS 在 VSG 领域的应用较少，而且现有研究主要聚焦于 VSG 的励磁控制，抑制由励磁部分造成的负阻尼效应导致的低频振荡。GPSS 虽具有鲁棒性好、恒正阻尼的优点，但同样无法消除 VSG 较大的响应超调，容易引发过流保护，且可能存在调节时间较长的问题。

为揭示影响 VSG 功率超调和调节时间的因素，本文首先建立并网 VSG 的小信号模型，分析了传统 VSG 有功功率响应的振荡机理，指出了系统参数调节过程中存在的矛盾。然后，从极点配置角度对基于 GPSS 的 VSG 控制策略进行了小信号分析，揭示其超调较大和调整时间较长的问题及原因。最后，基于上述分析，根据 GPSS 思想，提出了基于超前滞后环节前馈阻尼补偿的 VSG 控制策略，并建立该控制策略的小信号模型，根据零极点分布图对本文所提控制策略进行小信号稳定性分析和验证。基于 MATLAB/Simulink 的离线仿真结果表明在不影响系统稳态特性的前提下，该策略有效地抑制功率振荡，减小超调和调整时间，有效地解决了因频率响应过冲导致的惯性退化问题。

1　传统 VSG 基本原理及功率特性分析

1.1　传统 VSG 基本原理

如附录 A 图 A1 所示是三相电压源逆变器的传统 VSG 并网电路拓扑以及控制框图。U_d 为代表分布式电源的直流电压源，通过逆变器和滤波线路与无限大电网相连。图 A1 中，L_f 和 R_f 分别为滤波电感和寄生电阻；C_f 为滤波电容；U_{abc} 和 I_{Labc} 分别是滤波电容的电压和滤波电感的电流；I_{abc} 为 VSG 输出电流；P_e 和 Q_e 分别为 VSG 输出的有功电磁功率和无功功率；P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为参考有功和无功功率；P_m 为 VSG 的机械功率；U_e 和 θ 分别是 VSG 的参考电压幅值和相角；S_{abc} 为开关管触发信号；Z_g 为 VSG 与大电网并网线路的等效阻抗，包括等效线路电感 L_g 和等效线路电阻 R_g；U_{gabc} 为电网电压。

传统 VSG 控制结构由有功控制和无功控制两部分组成，其中调速控制器和 VSG 惯量阻尼控制器控制有功功率；励磁控制器控制无功功率。这两

部分分别输出相角和电压幅值，合成参考电压矢量，经过 *dq* 坐标变换作为电压电流双环控制环节的输入参考值。最终通过 SVPWM 调制器产生控制开关管通断的信号，实现经典的 VSG 控制。在传统 VSG 控制策略中，采用电压电流双闭环控制[23]来跟踪 VSG 功率外环输出的电压幅值和频率指令，由于电压电流双环控制的响应速度远大于功率内环，因此可以忽略双内环动态过程对外环的影响[17]。转子运动方程为核心控制环节，其中虚拟惯量和虚拟阻尼的引入使得 VSG 具有类似同步发电机的运行特性，具有为系统提供一定的惯性和阻尼，改善系统稳定性的能力。等效的转子运动方程如式(1)所示：

$$\begin{cases} J\omega_0 \dfrac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t} = P_\mathrm{m} - P_\mathrm{e} - D\omega_0\left(\omega-\omega_0\right) \\ \Delta\omega = \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega - \omega_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：J 为虚拟惯量；D 为虚拟阻尼；ω 为 VSG 输出角频率；ω_0 为 VSG 输出角频率的参考值；$\Delta\omega$ 为 VSG 输出角频率和参考值的差值；P_m 为 VSG 机械功率，由调速控制器输出，公式如式(2)所示：

$$P_\mathrm{m} = P_\mathrm{ref} - K_\omega\left(\omega-\omega_0\right) \tag{2}$$

式中：K_ω 为有功下垂系数。可见 VSG 的机械功率由角频率差值和有功参考值共同决定。根据式(1)、式(2)得到 VSG 有功功率控制框图如附录 A 图 A2 所示。

VSG 无功功率由励磁控制器进行控制，其表达式为：

$$U_\mathrm{e} = U_0 - \left(K_\mathrm{p} + \frac{K_\mathrm{i}}{s}\right)\left(Q_\mathrm{e} - Q_\mathrm{ref}\right) \tag{3}$$

式中：U_0 为额定参考电压幅值；K_p 和 K_i 为 PI 控制器的比例系数和积分系数。

1.2 传统 VSG 功率响应特性分析

根据线路功率传输原理，VSG 输出的电磁功率可以表示为[12]：

$$P_\mathrm{e} = \frac{3UU_\mathrm{g}}{X}\delta \tag{4}$$

式中：U 为 VSG 输出电压有效值；U_g 为电网电压有效值；δ 为 VSG 输出电压与电网电压相角差；X 为 VSG 等效输出电抗。

根据式(4)，结合图 A2 所示传统 VSG 有功功率控制框图可以得到有功功率闭环等效控制框图如附录 A 图 A3 所示。图中：S_E=3UU_g/X。

VSG 的转子运动方程中引入了虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D，因此具有传统同步发电机的惯量和阻尼特性。其中 J 引入后系统变成了二阶系统，使得 VSG 具有与同步发电机相似的功率振荡特性，因而输出的有功功率存在低频振荡问题。在 VSG 有功控制中 J 和 D 是两个非常重要的可调参数，J 和 D 的选取，对于 VSG 的稳态特性和动态特性具有重要的影响。下面根据自动控制理论分析 VSG 参数对系统暂态稳定性的影响。

根据图 A3 可推导出 VSG 输出有功功率 P_e 的小信号传递函数为：

$$\begin{aligned} \Delta P_\mathrm{e} = {} & \frac{S_\mathrm{E}}{J\omega_0 s^2 + \left(D\omega_0 + K_\omega\right)s + S_\mathrm{E}}\Delta P_\mathrm{ref} + \\ & \frac{\left(J\omega_0 \mathrm{s} + D\omega_0 + K_\omega\right)S_\mathrm{E}}{J\omega_0 s^2 + \left(D\omega_0 + K_\omega\right)s + S_\mathrm{E}}\Delta\omega_\mathrm{g} \end{aligned} \tag{5}$$

式中：$\Delta\omega_\mathrm{g}$=ω_0−ω_g 为电网角频率差值。

1）稳态特性

根据式(5)可知，在电网频率波动工况下，VSG 输出有功功率与电网角频率的闭环小信号传递函数为：

$$\Delta P_\mathrm{e} = \frac{\left(J\omega_0 s + D\omega_0 + K_\omega\right)S_\mathrm{E}}{J\omega_0 s^2 + \left(D\omega_0 + K_\omega\right)s + S_\mathrm{E}}\Delta\omega_\mathrm{g} \tag{6}$$

当电网频率出现跌落时，VSG 达到稳态时输出有功功率的差值为：

$$\Delta P_{\mathrm{e}0} = \lim_{s\to 0}\Delta P_\mathrm{e} = \left(D\omega_0 + K_\omega\right)\Delta\omega_\mathrm{g} \tag{7}$$

由式(7)可以看出，VSG 在电网频率跌落后 $\Delta\omega_\mathrm{g}$ 不为零，输出功率的稳态差值大小和 D 与 K_ω 的取值有关。因此，实际上 D 与 K_ω 具有相同的作用，即增大阻尼系数在为系统提供阻尼的同时，还会影响功率的稳态下垂特性，D 变大会导致功率稳态误差变大。

2）动态特性

由式(5)可知，有功功率的小信号模型为典型的二阶模型，在参考功率阶跃的工况下，VSG 输出功率的小信号传递函数为：

$$\frac{\Delta P_\mathrm{e}}{\Delta P_\mathrm{ref}} = \frac{S_\mathrm{E}}{J\omega_0 s^2 + \left(D\omega_0 + K_\omega\right)s + S_\mathrm{E}} \tag{8}$$

可以得到自然振荡角频率和阻尼比为：

$$\begin{cases} \omega_\mathrm{n} = \sqrt{\dfrac{S_\mathrm{E}}{J\omega_0}} \\ \zeta = \dfrac{K_\omega + D\omega_0}{2}\sqrt{\dfrac{1}{J\omega_0 S_\mathrm{E}}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：ω_n 为自然振荡角频率；ζ 为阻尼比。根据经典自动控制理论，当系统处于欠阻尼状态（0<ζ<1）、

误差范围取 2%时，有功功率暂态振荡过程的超调量和调节时间分别为：

$$\begin{cases}\sigma\% = \mathrm{e}^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% \\ t_{\mathrm{s}} = \dfrac{4}{\zeta\omega_{\mathrm{n}}}\end{cases} \tag{10}$$

根据式(9)、(10)可得，自然振荡角频率与阻尼比均和 J 呈负相关，阻尼比只和 D 呈正相关。因此 J 增大(减小)，系统自然振荡角频率和阻尼比会减小(增大)，VSG 有功功率超调量会增大(减小)，频率超调量会减小(增大)而且调节时间会增大(减小)；当 D 增大(减小)，阻尼比会增大(减小)，系统超调量会减小(增大)，调节时间会减小(增大)。然而，调节 D 虽然可以增加系统阻尼，但也会增加稳态功率误差。系统自然振荡角频率和阻尼比都与 J 相关，而只调节 J 并不能同时满足自然振荡角频率和阻尼比的调节需求，不能同时达到抑制功率振荡和较平缓的频率响应的控制目标。过度调整 J 的值会导致较大的频率过冲，严重威胁系统的稳定运行。

综上所述，虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D 对 VSG 的稳态特性和动态特性具有重要影响。然而，在选取 J 和 D 时，总存在无法从根本上解决的矛盾。因此，系统阻尼对动态性能的改善需要更深层次的研究，而增加辅助控制环节对系统进行暂态阻尼补偿是常用的方法。GPSS 因具有较好的振荡抑制能力得到了广泛的应用，但应用到 VSG 中仍存在超调较大、调整时间较长的问题。下一章将建立基于 GPSS 的 VSG 小信号模型并进行稳定性分析。

2　基于 GPSS 的 VSG 阻尼控制策略

2.1　基于 GPSS 的 VSG 阻尼控制原理

GPSS 因能够很好地解决传统电力系统的功频振荡问题得到了广泛的应用。基于此，相关学者通过在 VSG 有功控制通路上设计 GPSS 附加控制器以解决功率振荡问题，但由于有功超调和调整时间之间存在矛盾，使得控制效果并不理想。为究其原因，本章将建立基于 GPSS 阻尼补偿的 VSG 控制策略的小信号模型，从极点配置角度对功率响应特性进行分析。

基于 GPSS 阻尼补偿的 VSG 控制策略（GPSS-VSG）框图如附录 B 图 B1 所示。图中虚线框部分为 GPSS-VSG 附加阻尼控制结构，从右到左由超前滞后环节、高通滤波环节和增益环节 3 部分组成，最终输出附加功率 ΔP_{s}。K_{s} 为增益系数；a_{s} 为超前滞后环节的分度系数；T_{s} 为超前滞后环节的时间常数；τ_{s} 为高通滤波器的时间常数。

2.2　GPSS-VSG 策略稳定性问题分析

根据附录 B 图 B1 所示 GPSS-VSG 闭环控制框图得到附录 B 式(B1)所示的小信号传递函数模型，并对其进行稳定性分析。根据式(B1)可得，当电网频率偏离额定值时，VSG 输出功率也会偏离参考值，偏差如式(B2)所示。对比式(B2)与式(7)可得，GPSS-VSG 在重新达到稳态时的有功偏差只与下垂系数有关，不会影响系统稳态下垂特性。

1）参数设计

系统零点过度靠近虚轴时会导致系统响应出现超调，为保证零点所造成的不利影响尽可能小，应使得系统零点远离虚轴。根据式(B1)可得有功功率小信号模型的零点位置仅和 T_{s} 和 τ_{s} 有关，令 $m_1s^2+m_2s+m_3=0$ 并进行求解得到零点为$-T_{\mathrm{s}}$和$-1/\tau_{\mathrm{s}}$。当 T_{s} 的取值越大、滤波时间常数 τ_{s} 的取值越小时，系统零点距离虚轴越远。但为了保证足够的阻尼，滤波环节的 τ_{s} 取值通常不应太小[17]。因此将 τ_{s} 设置为 0.5。同时 T_{s} 取值不应太小，本文取 36，下文将结合零极点图进行验证，并对 K_{s} 和 a_{s} 的选取进行说明。

2）稳定性问题分析

根据 GPSS-VSG 的小信号模型绘制附录 B 图 B2 所示 K_{s} 从 0 均匀变化到 5000，T_{s} 从 1 均匀变化到 50 的零极点分布图。

附录 B 图 B2(a)所示为 K_{s} 变化时 GPSS-VSG 系统零极点运动轨迹。K_{s} 很小时，极点 $p_{\mathrm{s}2}$ 与零点 $z_{\mathrm{s}2}$ 距离很近，组成一对偶极子，对功率响应的影响可忽略不计，此时 $p_{\mathrm{s}3}$ 和 $p_{\mathrm{s}4}$ 为主导极点，系统欠阻尼，存在振荡。随着 K_{s} 增大，$p_{\mathrm{s}3}$、$p_{\mathrm{s}4}$ 逐渐远离虚轴，$p_{\mathrm{s}1}$、$p_{\mathrm{s}2}$ 成为主导极点。如图中标识所示，当 K_{s} 增大到 1000 时，主导极点位于实轴且距离虚轴较远，系统在过阻尼状态下响应时间较短，振荡消失。随着 $p_{\mathrm{s}1}$ 继续向虚轴靠近，与 $p_{\mathrm{s}2}$ 在实轴上相遇并分离，同时向靠近虚轴的方向移动，系统重新出现振荡。由于 $p_{\mathrm{s}1}$、$p_{\mathrm{s}2}$ 非常靠近虚轴，导致系统调整时间变长。需要注意的是，由于在过阻尼状态下固定零点距离虚轴比主导极点更近，有功功率会产生超调现象[24]，对系统稳定性产生不可忽略的影响。因此，GPSS-VSG 控制策略虽能够抑制功率振荡，但存在超调较大和调整时间较长的问题。

在图 B2 (b)中，极点 p_{s1}、p_{s2} 为主导极点。根据上文分析可知 T_s 会同时影响零点和极点位置，当 T_s=36 时，z_{s1} 离虚轴较远。如图中标识所示，主导极点位于实轴，系统过阻尼，振荡消失。由于 a_s 变化时主导零极点分布与 K_s 变化时相似，因此不再赘述，零极点分布图见附录 C 图 C1，本文取 a_s=10，此时系统过阻尼，不存在振荡。

综上所述，GPSS-VSG 能够对功率振荡产生一定的抑制作用，但由于系统存在比主导极点距虚轴更近的零点，导致了 VSG 输出有功功率存在较大的超调和较长的调整时间，而且通过调整参数无法提供自由调节的阻尼。因此，系统阻尼调节自由度低和功率响应超调较大且无法消除的问题亟需解决。

3 基于超前滞后环节附加前馈阻尼的 VSG 控制策略

将式(2)带入式(1)可得式(11)所示整理后的转子动能方程为：

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{\mathrm{ref}}}{J\omega_0}-\frac{P_{\mathrm{e}}}{J\omega_0}-\frac{(D\omega_0+K_\omega)\Delta\omega}{J\omega_0} \tag{11}$$

由式(11)可知，当系统的参考功率发生变化时，与 SG 类似，传统 VSG 的虚拟转子根据参考功率和输出电磁功率的差值进行加速或减速。输出有功功率产生振荡与超调的原因是 dω/dt=0 时刻之后，$\Delta\omega$ 无法立刻减小为 0，导致 $\Delta\delta$ 继续增大或减小[25]。分析 GPSS-VSG 的控制结构可知，其中包含超前滞后环节。利用频率差值通过该超前滞后环节可以直接对 VSG 角频率进行校正控制，补偿由控制、测量环节产生的相位差，从而为系统提供正阻尼[22]。

3.1 基于超前滞后环节附加前馈阻尼的 VSG 控制原理

为进一步改善 GPSS-VSG 系统动态特性，本文直接将 GPSS 中能够提供超前相位的部分引入 VSG 有功控制通路。提出了一种基于附加超前滞后环节的 VSG 前馈阻尼控制策略(feedforward damping control strategy for VSG，FDC-VSG)。

FDC-VSG 控制策略的有功闭环控制框图如图 1 所示。FDC-VSG 输入为 VSG 输出频率和电网频率的差值，经过超前滞后控制器后得到的暂态补偿角频率 $\Delta\omega_F$ 表示：

$$\Delta\omega_F=K_{\mathrm{f}}\frac{s+a_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{f}}}{s+T_{\mathrm{f}}}\Delta f_{\mathrm{g}} \tag{12}$$

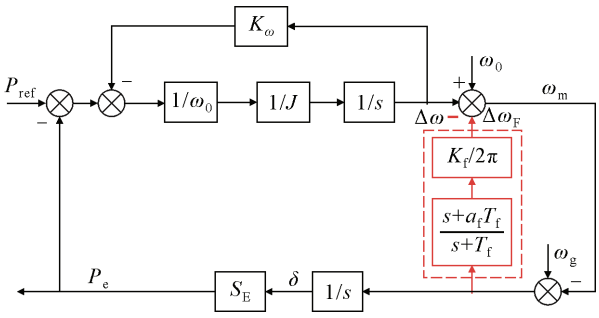


图 1 FDC-VSG 有功闭环控制框图

Fig.1 FDC-VSG active closed-loop control block diagram

式中：a_{f} 和 T_{f} 分别为超前滞后环节的分度系数和时间常数；K_{f} 为增益系数。为了方便分析，这里用式(13)所示的角频率差值代替频率差值。

$$\Delta\omega_F=\frac{s+a_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{f}}}{s+T_{\mathrm{f}}}\frac{K_{\mathrm{f}}}{2\pi}\left(\omega-\omega_{\mathrm{g}}\right) \tag{13}$$

同时为了避免在实际应用中因测量电网频率而引入锁相环，以及微分环节导致的暂态稳定性问题，VSG 输出角频率与电网角频率的差值可以根据 VSG 输出功率求得：

$$\Delta\omega_{\mathrm{g}}=\frac{P_{\mathrm{e}}}{S_{\mathrm{E}}}s \tag{14}$$

因此，将式(14)带入式(13)，得到输入为 VSG 有功功率，输出为角频率的传递函数。为了避免微分项造成高频噪声，导致新的稳定性问题，将带有微分环节项的部分传递函数进行分离，得到：

$$\Delta\omega_{\mathrm{F}}=\left(\frac{s^2}{s+T_{\mathrm{f}}}+\frac{a_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{f}}s}{s+T_{\mathrm{f}}}\right)\frac{K_{\mathrm{f}}}{2\pi S_{\mathrm{E}}}P_{\mathrm{e}} \tag{15}$$

根据图 A3 可知 VSG 相角与角频率存在微分的关系，因此可将 $\Delta\omega_{\mathrm{F}}$ 等效为以下两部分：

$$\begin{cases}\Delta\omega_{\mathrm{f}}=\dfrac{a_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{f}}s}{s+T_{\mathrm{f}}}\dfrac{K_{\mathrm{f}}}{2\pi S_{\mathrm{E}}}P_{\mathrm{e}}\\ \Delta\delta_{\mathrm{f}}=\dfrac{s}{s+T_{\mathrm{f}}}\dfrac{K_{\mathrm{f}}}{2\pi S_{\mathrm{E}}}P_{\mathrm{e}}\end{cases} \tag{16}$$

图 2 所示为 FDC-VSG 控制策略的等效闭环控制框图。其中输入为 VSG 电磁功率 P_{e}，经增益系数调整后，分别通过超前和滞后环节对角频率和相位进行前馈补偿校正，增加系统阻尼。图 2 中的附加控制实质上是通过 VSG 输出功率对角频率进行惯性校正，使得角频率在初始惯性作用下变化后和功率同时恢复稳态值。

3.2 FDC-VSG 策略小信号稳定性分析

FDC-VSG 策略小信号稳定性分析如下式所示：

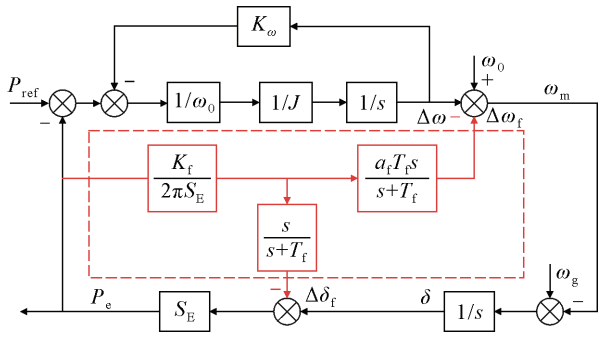


图 2　FDC-VSG 有功闭环等效控制框图

Fig.2　FDC-VSG active closed-loop equivalent control block diagram

$$\begin{cases}\Delta P_e = \dfrac{m_1 s + m_2}{n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s + n_4}\Delta P_{ref} + \dfrac{m_3 s^2 + m_4 s + m_5}{n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s + n_4}\Delta\omega_g \\ m_1 = 2\pi S_E \\ m_2 = 2\pi S_E T_f \\ m_3 = 2\pi J\omega_0 S_E \\ m_4 = 2\pi J\omega_0 S_E T_f + 2\pi S_E K_\omega \\ m_5 = 2\pi S_E T_f K_\omega \\ n_1 = 2\pi J\omega_0 + J\omega_0 K_f \\ n_2 = (2\pi + K_f)K_\omega + J\omega_0(K_f a_f T_f + 2\pi T_f) \\ n_3 = K_\omega(K_f a_f T_f + 2\pi T_f) + 2\pi S_E \\ n_4 = 2\pi S_E T_f \end{cases} \tag{17}$$

根据图 2 即可得到式(17)所示的 FDC-VSG 输出有功功率小信号闭环传递函数表达式，并分别对其进行稳态和动态分析。

1）稳态特性

根据式(17)得到电网频率波动工况下，系统重新稳定后 VSG 输出功率的稳态差值为：

$$\Delta P_{ef0} = \lim_{s\to 0}\Delta P_{ef} = K_\omega \Delta\omega_g \tag{18}$$

对比式(18)与式(A2)、式(7)可得，FDC-VSG 同样不会增加 VSG 功率的稳态误差。

2）动态特性

根据式(17)所示 FDC-VSG 的小信号模型，分别绘制出图 3 所示当增益系数 K_f 和超前滞后环节时间常数 T_f 变化时，系统的零极点分布情况图。通过对比小信号模型可以看到，FDC-VSG 由于取消了滤波环节，相比于 GPSS-VSG 少了一个极点和一个比主导极点更靠近虚轴的零点，降低了引入超调的风险。设计参数时仅需考虑阻尼大小，与调整时间即可。

图 3(a)给出了 K_f 从 1 均匀增加到 30 时有功闭环小信号传递函数的零极点分布情况。如图所示，K_f=1 时，零点 z_1 和极点 p_3 距离很近，构成一对偶极子。K_f 开始增大后，主导极点对 p_1、p_2 逐渐靠近实轴，系统阻尼比不断增大，系统稳定性变好，振荡得到抑制。如图中标识所示，当 K_f 增大到 5 时，p_1、p_2 在实轴相遇成为实极点，此时系统刚好进入过阻尼状态，振荡和超调消失，动态性能最好。当 K_f 继续增大时，p_3 逐渐与 z_1 分离，成为主导极点开始单独起作用，并逐渐靠近虚轴，这将会导致调整时间变长，因此 K_f 取值不宜过大。

图 3(b)给出了 T_f 从 1 均匀增大到 30 时，有功闭环小信号传递函数的零极点分布情况。可以看到 T_f 变化会同时影响极点和零点的位置。T_f 很小时，极点 p_3 和零点 z_1 构成一对偶极子，此时 p_1、p_2 为主导极点。随着 T_f 增大，p_1、p_2 逐渐向实轴靠拢，系统阻尼比不断增大，相遇后沿实轴向两侧分离，系统进入过阻尼状态。如图中标识所示，当 T_f=6 时，p_3 比 z_1 距离虚轴更近，对系统稳定性的影响更大，因此 z_1 不会引起超调。由于 z_1 移动的速度比 p_3 快，会先后与 p_3 和 p_2 组成偶极子，在这个过程中 p_2 和 p_3 交替成为主导极点，系统仍处于过阻尼状态，功率无振荡与超调。T_f 进一步增大，零点 z_1 逐渐远离虚轴，对系统的影响逐渐变小，p_2、p_3 相遇并远离实轴，构成一对共轭主导极点，系统重新过度到欠阻尼状态，功率振荡与超调再次出现。由于分度系数 a_f 变化时系统零极点分布与 K_f 变化时相近，因此不再赘述。a_f 从 1 均匀变化到 30 的零极点分布图如附录 C 图 C2 所示，本文取 a_f=10，如图中标识所示，此时系统动态性能最佳。

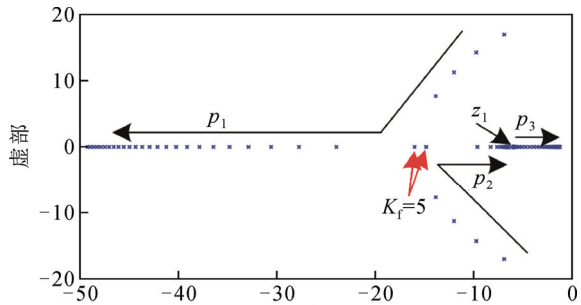
4　仿真验证

4.1　仿真参数

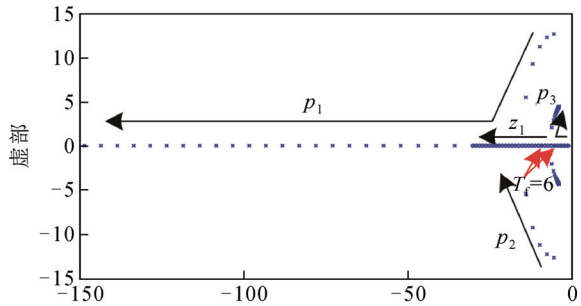
为了验证所提控制策略的正确性和有效性，本文基于 Matlab/Simulink 软件搭建了如附录 A 图 A1 所示的容量为 60 kW 的 VSG 单机无穷大系统仿真模型，其中开关采样频率设置为 10 kHz。仿真参数如表 1 所示。

4.2　GPSS-VSG 仿真验证

为研究不同增益系数 K_s 对 GPSS-VSG 的控制效果的影响规律，首先单独对该控制策略进行参考有功功率阶跃仿真，以获得较为合理的 K_s 取值范围；然后与传统 VSG 的仿真结果进行对比分析。



(a) 增益系数K_f变化时(a_f=10, T_f=6)



(b) 时间常数T_f变化时(a_f=10, K_f=5)

图 3 FDC-VSG 策略零极点分布图

Fig.3 FDC-VSG strategy zero pole distribution map

表 1 仿真系统参数

Table 1 Simulation system parameters

参数	数值	参数	数值
有功下垂系数 K_ω	2000	滤波电感 L_f	0.5 mH
无功下垂系数 D_q	1/5000	滤波电容 C_f	10 μF
转动惯量 J	1 kg·m^2	参考功率 P_{ref}	10 kW
阻尼系数 D	0	直流电压 U_{dc}	700 V
额定角频率 ω_0	314 rad/s	线路电阻 R_g	0.1 Ω
额定电压幅值 U_m	311 V	线路电感 L_g	0.8 mH

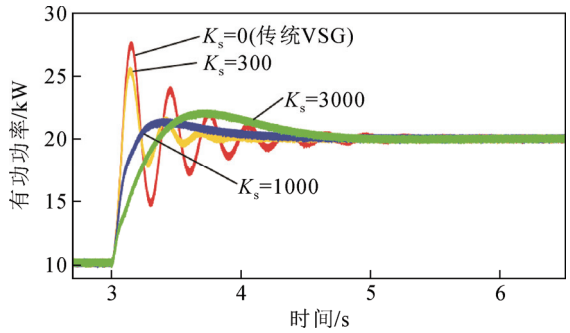


图 4 GPSS-VSG 策略有功仿真结果

Fig.4 GPSS-VSG strategy active power simulation results

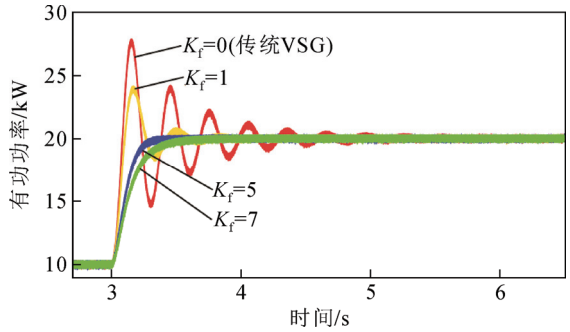


图 5 K_f不同时 FDC-VSG 有功仿真结果

Fig.5 FDC-VSG active power simulation results with different K_f

在 3 s 时将有功参考向上阶跃 10 kW,仿真结果如图 4 所示。仿真结果表明,GPSS-VSG 较传统 VSG 控制策略有更强的功率振荡抑制能力。其控制效果与增益系数有关，随着 K_s 的增大，功率振荡得到了较明显的抑制，但仍然存在一个较大的超调，如上文的理论分析所述，这是距离虚轴较近的固定零点造成的。而且 K_s 进一步增大后，有功功率重新出现轻微振荡，调整时间变长，而超调反而有所增大。仿真结果验证了上文的理论分析。

4.3 FDC-VSG 仿真验证

为研究不同增益系数 K_f 以及时间常数 T_f 对 FDC-VSG 的控制效果的影响规律，单独对该控制策略进行参考有功功率阶跃仿真，以获得两个参数较为合理的取值区间。

图 5 为 T_f=6，K_f取值不同时，FDC-VSG 控制策略对 VSG 有功功率振荡抑制效果的仿真结果。从图 5 中可以看出，随着 K_f的增加，VSG 输出有功功率的超调明显减小。传统 VSG 控制策略相当于 FDC-VSG 的 K_f取 0 时的功率响应，此时系统阻尼较小，对有功功率振荡的抑制作用较弱，超调较大。当 K_f取值增大到 5 时，可以看到 VSG 的有功振荡消失，并且超调和调整时间大大降低。当 K_f 进一步增大时，FDC-VSG 继续保持着较好的功率振荡和超调抑制效果，但调整时间变长。

保持仿真工况不变，K_f=5 的条件下，T_f从 0 增大到 10，有功功率波形如图 6 所示。从图中可看出，当时间常数 T_f取不同值时，有功功率的振荡得到了不同程度的抑制。但是当 T_f=10 时，有功重新出现了不明显的超调。和上文理论分析的结果保持一致，再次验证了本文所提方案的有效性。

4.4 3 种控制策略对比仿真验证

定义有功功率超调 σ 为：

$$\sigma = \left| \frac{P_{\max/\min} - P_{e,3s}}{\Delta P_{ref}} \right| \times 100\% \tag{19}$$

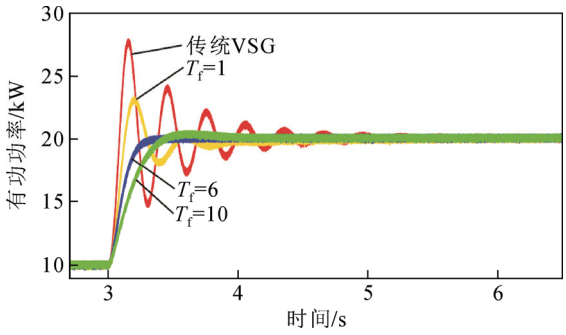


图 6　T_f不同时 FDC-VSG 有功仿真结果

Fig.6　FDC-VSG active power simulation results with different T_f

式中：$P_{e,max/min}$ 为有功功率暂态响应过程中的最大或最小值；$P_{e,3s}$ 为暂态后稳态的有功值；ΔP_{ref} 为参考有功的阶跃值。定义调节时间 T_a 为有功大小开始恒定小于参考有功的 2%所用时间。

为进一步体现本文所提控制策略的优越性，对 3 种控制策略进行对比仿真。主要控制参数设置：传统 VSG 的阻尼系数 D=0；GPSS-VSG 增益值 K_s=1000；FDC-VSG 的增益系数与时间常数分别为 K_f=5，T_f=6。仿真结果如图 7 和图 8 所示。

1）功率阶跃实验

在 3 s 时设置 10 kW 的参考功率阶跃仿真实验，结果如图 7 所示。可以看到 GPSS-VSG 能够有效地抑制功率振荡，但仍然具有较大的超调和较久的调整时间；而 FDC-VSG 在消除振荡和超调的同时，大大缩短调整时间，仿真结果证明 FDC-VSG 对比 GPSS-VSG 和传统 VSG 控制策略具有更好的动态功率响应。在频率响应方面 FDC-VSG 相比于其他两种控制策略，频率过冲更小，表现出更加优秀的惯性响应，能够在新能源大量并网的情况下充分发挥 VSG 的阻尼和惯量特性。

2）频率阶跃实验

在 3 s 时设置电网因故障频率跌落 0.05 Hz，图 8 所示为 3 种方案的功率响应。由于下垂特性的作用，系统重新到达稳态时会有一个有功偏差，由式(7)可得这个偏差理论上约为 628 W。从图 8 中可以看出，从稳态性能的角度来看，D=0 时的传统 VSG 策略具有约 628 W 的稳态偏差；而当 D=K_ω 时，该偏差增加了一倍，约为 1256 W。仿真结果与根据式(7)分析得到的理论结果一致。GPSS-VSG 和 FDC-VSG 策略均不会增加稳态偏差。然而，相比于传统 VSG 策略，在功率响应过程中 GPSS-VSG

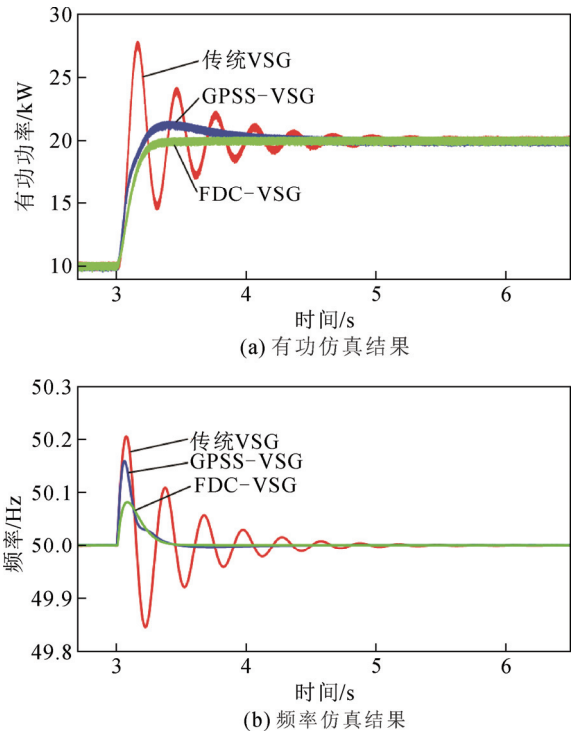


图 7　3 种控制策略仿真对比

Fig.7　Simulation comparison of three control strategies

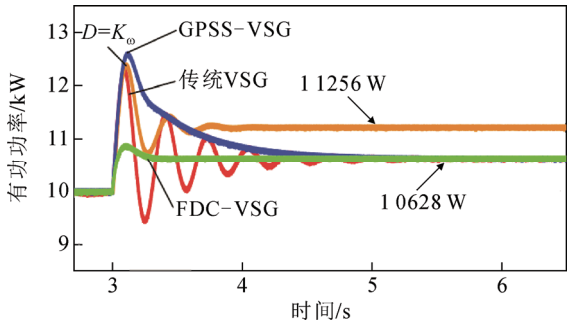


图 8　电网频率跌落时 3 种策略仿真对比

Fig.8　Simulation comparison of three strategies for grid frequency fluctuation

振荡消除，但具有更大的超调，且调整时间较长，存在引发过流保护的风险。而 FDC-VSG 仅存在一个很小的超调且没有振荡。

表 2 所示为两种工况的 3 种不同控制策略下，暂态响应超调大小及调整时间。

综上所述，FDC-VSG 控制策略不会增大有功的稳态偏差，通过调整增益系数 K_f 和时间常数 T_f，能够在抑制系统振荡减小超调方面表现出更加优秀的性能，仿真结果与理论分析一致。验证了 FDC-VSG 策略的正确性和有效性。

表 2 不同控制策略有功动态响应性能

Table 2 Active dynamic response performance of different control strategies

控制策略	传统 VSG		GPSS-VSG		FDC-VSG	
	σ/%	T_a/s	σ/%	T_a/s	σ/%	T_a/s
参考功率扰动	75.8	1.51	15.0	1.15	0	0.27
电网频率扰动	258.3	1.07	314.0	1.05	35.4	0.15

5 结论

本文根据 GPSS 思想提出了一种基于超前滞后环节阻尼前馈补偿的控制策略对原有的控制策略进行改进，并成功验证了其有效性及优越性，为利用 GPSS 改善 VSG 的性能提供了一种新的方法和途径。主要结论如下：

1）建立小信号模型，对 VSG 系统有功振荡机理进行研究可得，传统 VSG 阻尼系数会影响到系统一次调频特性，增大功率稳态偏差；减小虚拟惯量能够增加系统阻尼，但会引起较大的频率过冲。

2）依据零极点配置准则对 GPSS-VSG 控制系统进行分析，研究发现 GPSS-VSG 不会增加系统功率稳态偏差且能够阻尼功率振荡，但在保证足够阻尼情况下，引入的零点比主导极点更靠近虚轴，主导极点不足以抑制零点造成的超调，导致功率超调较大和调整时间较长。即阻尼大小受超调量和调节时间约束，限制了阻尼调节的自由度。

3）提出的基于超前滞后环节阻尼前馈补偿的 VSG 控制策略能够更有效地抑制有功低频振荡。既不会增加系统稳态功率偏差，又能减小超调，缩短调节时间，并且不会引起频率过冲。与 GPSS-VSG 相比，具有更高的阻尼调节自由度，通过参数调整可以实现对系统动态性能的一致性改善。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 侯 恺，刘泽宇，贾宏杰，等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.

[3] 杨天鑫，黄云辉，唐金锐，等. 高比例新能源下含调频控制的储能系统多目标优化[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2744-2753.
YANG Tianxin, HUANG Yunhui, TANG Jinrui, et al. Multi-objective optimization of energy storage system with frequency regulation control under high proportion of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2744-2753.

[4] 赵清林，郭小强，邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术研究[J]. 中国电机工程学报，2007，27(16)：60-64.
ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 60-64.

[5] 周京华，李 津. 微电网三电平储能变流器优化控制技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3137-3147.
ZHOU Jinghua, LI Jin. Review of optimal control technology for three-level power converter system in microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3137-3147.

[6] 程雪坤，刘 辉，田云峰，等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. 电网技术，2021，45(2)：518-525.
CHENG Xuekun, LIU Hui, TIAN Yunfeng, et al. Review of transient power angle stability of doubly-fed induction generator with virtual synchronous generator technology integration system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 518-525.

[7] 张祥宇，王志伟，付 媛. 光储发电系统的虚拟轴系耦合与同步控制[J]. 高电压技术，2023，49(1)：342-352.
ZHANG Xiangyu, WANG Zhiwei, FU Yuan. Virtual shafting coupling and synchronous control for photovoltaic energy storage system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 342-352.

[8] 温春雪，陈 丹，胡长斌，等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化，2018，42(17)：120-126，183.
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126, 183.

[9] 陈宇杰，王 淳，王 青，等. 基于角频率偏差补偿的 VSG 有功控制[J]. 电网技术，2019，43(9)：3432-3438.
CHEN Yujie, WANG Chun, WANG Qing, et al. A VSG active power control based on angular frequency deviation compensation[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3432-3438.

[10] 李明烜，王 跃，徐宁一，等. 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报，2018，33(10)：2176-2185.
LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.

[11] 李志军，贾学岩，王丽娟，等. 基于改进惯量阻尼特性的 VSG 控制策略[J]. 太阳能学报，2021，42(7)：78-85.
LI Zhijun, JIA Xueyan, WANG Lijuan, et al. Improved virtual synchronous generator based on enhanced inertia and damping characteristics[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 78-85.

[12] YU Y, CHAUDHARY S K, TINAJERO G D A, et al. A reference-feedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7566-7571.

[13] LI M X, YU P, HU W H, et al. Phase feedforward damping control method for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9790-9806.

[14] 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.
LI Xin, LIU Guoliang, YANG Ranchen, et al. VSG control strategy with transient damping term and seamless switching control method[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2081-2088.

[15] 颜湘武，贾焦心. VSG 一次调频和转速振荡阻尼的解耦控制方案[J]. 电网技术，2019，43(5)：1566-1575.
YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin. Decoupling control of primary frequency regulation and rotational speed damping of VSG[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1566-1575.

[16] 周　晖，王　跃，李明烜，等. 孤岛并联虚拟同步发电机暂态功率分配机理分析与优化控制[J]. 电工技术学报，2019，34(增刊 2)：654-663.
ZHOU Hui, WANG Yue, LI Mingxuan, et al. Analysis and optimal control of transient active power sharing between islanded parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement2): 654-663.

[17] 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.

[18] BIAN X Y, GENG Y, LO K L, et al. Coordination of PSSs and SVC damping controller to improve probabilistic small-signal stability of power system with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2371-2382.

[19] 陈　谦，周文海，何承树，等. 采用三阶模型的虚拟同步发电机功率振荡特性分析及附加阻尼控制[J]. 高电压技术，2023，49(2)：682-690.
CHEN Qian, ZHOU Wenhai, HE Chengshu, et al. Characteristics analysis and suppression of power oscillation of virtual synchronous generator using three-order model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 682-690.

[20] SEBAA K, ZHOU Y, LI Y, et al. Low-frequency oscillation damping control for large-scale power system with simplified virtual synchronous machine[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1424-1435.

[21] 马铱林，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.
MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 269-275.

[22] GAO B T, XIA C P, CHEN N, et al. Virtual synchronous generator based auxiliary damping control design for the power system with renewable generation[J]. Energies, 2017, 10(8): 1146.

[23] 姜静雅. 虚拟同步机建模和特性优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.
JIANG Jingya. Modeling and characteristic improvement of virtual synchronous generator[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2022.

[24] 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.

[25] 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 Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1926.



兰　飞(通信作者)
1974—，男，硕士，教授级高工，硕导
主要从事新能源电力系统运行与控制等方面的研究工作
E-mail: lanfeigxu@163.com

LAN Fei
Professor
Corresponding author



高占兴
1999—，男，硕士生
主要从事微电网控制、虚拟同步发电机并网控制等方面的研究工作
E-mail: gaozhanxing2021@163.com

GAO Zhanxing



黎静华
1982—，女，博士，教授，博导
主要从事电力系统须眉化运行与控制、大规模风电并网运行等方面的工作
E-mail: happyjinghua@163.com

LI Jinghua
Ph.D., Professor

收稿日期　2023-08-14　修回日期　2023-11-14　　编辑　陈　蔓

附录 A

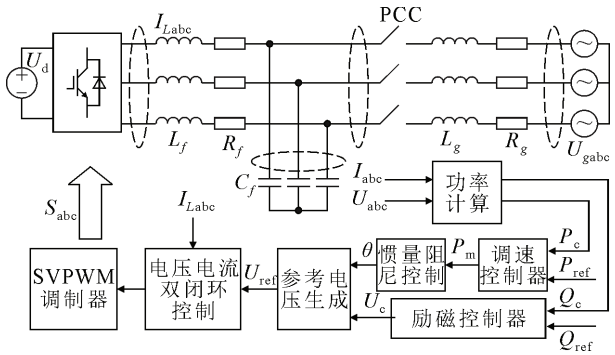


图 A1　传统 VSG 电路拓扑及控制框图

Fig.A1　Traditional VSG Circuit Topology and Control Block Diagram

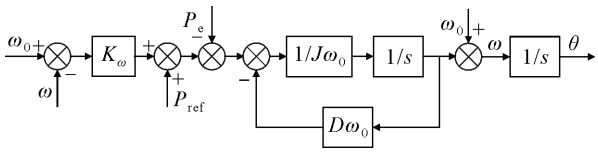


图 A2　传统 VSG 有功功率控制框图

Fig A2　Block Diagram of Traditional VSG Active Power Control

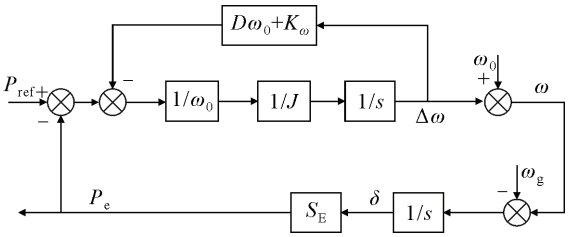


图 A3　传统 VSG 有功闭环等效控制框图

Fig.A3　Equivalent Block Diagram of Traditional VSG Active Closed Loop Control

附录 B

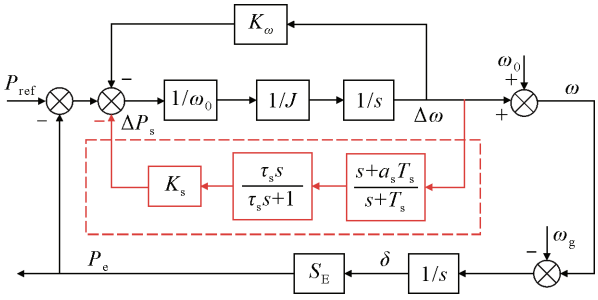
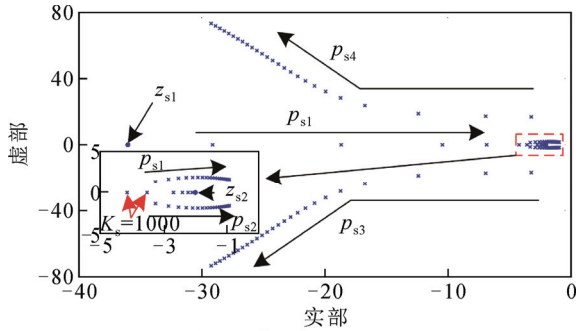


图 B1　GPSS-VSG 等效控制框图

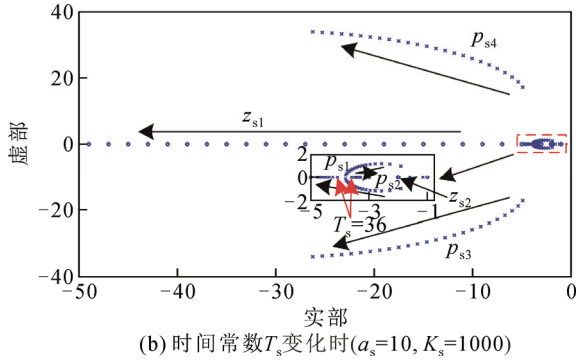
Fig.B1　GPSS-VSG Equivalent Control Block Diagram

$$
\begin{cases}
\Delta P_{es}=\dfrac{m_1 s^2+m_2 s+m_3}{n_1 s^4+n_2 s^3+n_3 s^2+n_4 s+n_5}\Delta P_{ref}+\\
\qquad\dfrac{m_4 s^3+m_5 s^2+m_6 s+m_7}{n_1 s^4+n_2 s^3+n_3 s^2+n_4 s+n_5}\Delta\omega_g\\
m_1=S_E\tau_s \qquad m_2=S_E(T_s\tau_s+1)\\
m_3=T_s S_E \qquad m_4=J\omega_0 S_E\tau_s\\
m_5=S_E\tau_s K_\omega+J\omega_0 S_E(T_s\tau_s+1)\\
m_6=S_E(T_s\tau_s+1)K_\omega+J\omega_0 S_E T_s\\
m_7=S_E T_s K_\omega \qquad n_1=\tau_s J\omega_0\\
n_2=J\omega_0(T_s\tau_s+1)+\tau_s(K_s+K_\omega)\\
n_3=K_\omega(T_s\tau_s+1)+K_s\tau_s a_s T_s+J\omega_0 T_s+\tau_s S_E\\
n_4=T_s K_\omega+S_E(T_s\tau_s+1)\\
n_5=S_E T_s
\end{cases}
\tag{B1}
$$

$$
\Delta P_{es0}=\lim_{s\to 0}\Delta P_{es}=K_\omega\Delta\omega_g \tag{B2}
$$



(a) 增益系数K_s变化时(a_s=10, T_s=36)



(b) 时间常数T_s变化时(a_s=10, K_s=1000)

图 B2　GPSS-VSG 策略零极点分布图

Fig.B2　GPSS-VSG strategy zero pole distribution diagram

附录 C

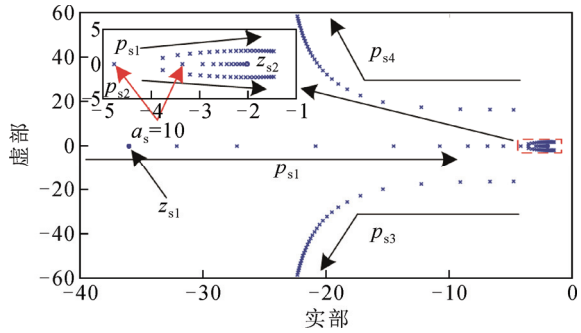


图 C1　a_s变化时 GPSS-VSG 零极点分布图(K_s=1000, T_s=36)

Fig.C1　Distribution map of GPSS-VSG zero and pole points when a_s changes(K_s=1000, T_s=36)

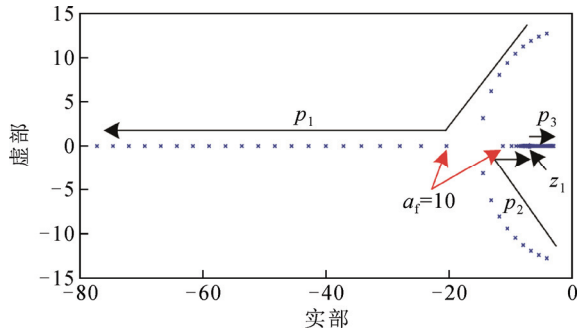


图 C2　a_f变化时 FDC-VSG 零极点分布图(K_f=5, T_f=6)

Fig.C2　Distribution map of FDC-VSG zero and pole points when $a_f$changes(K_f=5, T_f=6)