DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.68 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

基于功率动态区域划分的自适应虚拟同步发电机控制策略

智 明[1]，杨 飞[1]，刘东亮[1]，邹 杰[1]，程 鹏[1]，杨 飞[2]
(1.国网江苏省有限公司泰州供电分公司，泰州市，225300；2.国网上海能源互联网研究院有限公司，上海市，200120)

摘要：随着新能源在电网中的占比日益增大，电网总体的阻尼与惯量下降，电网的安全稳定运行受到了挑战。虚拟同步发电机VSG (virtual synchronous generator)技术通过模拟同步发电机特性，在给电网带来阻尼和惯量支撑的同时，不可避免地带来了有功低频振荡、有功稳态偏差等问题。通过系统地建立VSG模型，分析VSG的振荡机理，有功功率小信号模型揭示了转动惯量与阻尼系数产生有功低频振荡与有功稳态偏差的原理。为了能够抑制有功低频振荡和消除有功稳态偏差，提出基于功率动态区域划分的自适应VSG控制策略，根据功率变化速率的不同，将系统划分为加速区域与减速区域，从而自适应控制转动惯量与阻尼系数的增减速率，使得VSG在不同工作模态都具有良好的动态特性。所提策略有效抑制了VSG的有功低频振荡，减少了有功功率的稳态偏差，从而提高了VSG的有功功率支撑能力。最后，在MATLAB/Simulink中搭建了系统仿真模型，验证了所提策略的正确性。

关键词：低频振荡；稳态偏差；功率动态区域划分；增减速率；有功功率支撑

Adaptive Virtual Synchronous Generator Control Strategy Based on Power Dynamic Region Division

ZHI Ming[1], YANG Fei[1], LIU Dongliang[1], ZOU Jie[1], CHENG Peng[1], YANG Fei[2]
(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China; 2. State Grid Shanghai Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China.)

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy in the grid, the overall damping and inertia of the grid decline, which brings challenges to the safe and stable operation of the grid. Virtual synchronous generator (VSG) technology, by simulating the characteristics of synchronous generator, brings damping and inertia support to the grid. However, it inevitably brings problems such as active low-frequency oscillation and active steady-state deviation. Through the establishment of VSG model, the oscillation mechanism of VSG is analyzed. The small-signal model of active power reveals the principle of low-frequency oscillation and steady-state deviation of active power caused by moment of inertia and damping coefficient. In order to suppress the low-frequency oscillation of active power and eliminate the steady-state deviation of active power, an adaptive VSG control strategy based on power dynamic region division is proposed. According to the different power change rates, the system is divided into the acceleration region and the deceleration region, so as to adaptive control the rate of increase or decrease of the moment of inertia and the damping coefficient, so that VSG has good dynamic characteristics in different working modes. The proposed strategy can effectively suppress the active low-frequency oscillation of VSG, reduce the steady-state deviation of the active power, and improve the active power support capability of VSG. Finally, the system simulation model is built in MATLAB/Simulink, and the correctness of the proposed strategy is verified.

Keywords: Low-frequency oscillation; steady-state deviation; power dynamic region division; rate of increase and decrease; active power support

收稿日期：2024-04-01；**修回日期**：2024-05-14，2024-05-31，2024-06-28；**录用日期**：2024-07-06；**网络首发日期**：2024-08-14
基金项目：国网江苏省电力公司科技资助项目(J2023104)
This work is supported by State Grid Corporation of Jiangsu Electric Power Company under the grant J2023104

随着新能源大量接入电网，电力系统日益“电力电子”化，且由于新能源自身属于非同步发电机电源，因此借助电力电子逆变器并入电网后会导致电网总体阻尼和惯量下降，给电网的稳定运行带来一定的挑战[1-3]。

虚拟同步发电机 VSG (virtual synchronous generator)通过模拟同步发电机可为电网提供转动惯量和阻尼，解决了非同步发电机电源自身并网支撑能力不足的问题，但 VSG 在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，这就导致电网出现扰动时，VSG 可能会发生功率振荡[4]，给电网的稳定运行带来了新问题。文献[5]指出当 VSG 运行接近电网模态时，振荡会对电网的稳定运行产生一定的不利影响；文献[6]指出较大的转动惯量或下垂系数会导致系统低频特征根阻尼比降低，对系统稳定性产生不利影响。当 VSG 发生功率振荡时，过流能力弱、阻尼小的逆变器容易崩溃，不利于系统的稳定运行[7-9]。文献[10]指出在 VSG 原有的功率控制基础上叠加角频率偏差补偿，从而改善系统的动态性能，但是没有讨论阻尼系数对系统动态性能的影响。

文献[11]指出可以通过在系统原有的基础上添加附加反馈控制环节，进而提供额外的零点和极点来改善系统的动态性能，但该种方法会降低 VSG 的惯性响应特性，从而降低 VSG 的控制效果。文献[12]从模态分析的角度出发，提出同步相量的区域间振荡抑制综合控制策略来抑制有功功率振荡，但这无疑增加了系统的设计难度。VSG 的自适应控制策略可以有效提高控制的灵活性、可拓展性和可靠性[13-14]。文献[15]着重考虑转动惯量的自适应问题，提高了暂态响应能力，但是忽略了阻尼对系统稳定的影响；文献[16]兼顾了转动惯量与系统阻尼的影响，但其判断过程较为复杂，缺少灵活性。目前 VSG 的自适应控制多将关注点放在有功功率低频振荡上，过高的有功功率超调量对并网逆变器存在着安全风险，而对有功功率稳态偏差却较少提及[17-18]。

在上述文献的基础上，本文提出一种基于功率动态区域划分的自适应 VSG 控制策略，同时关注有功功率低频振荡与稳态有功偏差的问题，实现 VSG 动态特性与静态特性的有机结合。首先，系统地建立 VSG 模型，分析了 VSG 有功功率低频振荡与有功稳态偏差产生的原因；然后，对 VSG 的转动惯量与阻尼系数进行自适应速率调整，使得 VSG 在不同的工作模态都具有良好的参数特性，从而有效抑制有功低频振荡、减少有功稳态偏差，使得系统的有功支撑能力得以提升；最后，在 MATLAB/Simulink 中搭建系统仿真模型，验证了所提策略的正确性。

1　VSG 基本结构与原理

VSG 通过模拟同步发电机的输出特性从而使得并网逆变器具有类似同步发电机的功能，其基本电路结构如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流侧电压；C_{dc} 为直流侧电容；E_a、E_b、E_c 为逆变器输出端电压；L_f、R_f 分别为逆变器输出端滤波电感和寄生电阻；i_f 为流过逆变器滤波电感的电流；C_f 为滤波电容；u_{oa}、u_{ob}、u_{oc} 为滤波电容上的端电压；L_g、R_g 分别为电网侧的电感与电阻；u_{gi}(i=a, b, c)为电网电压。

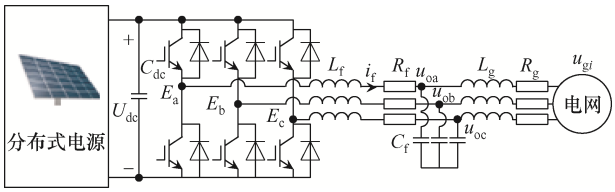


图 1　VSG 电路结构图

Fig. 1 Circuit structure diagram of VSG

不考虑输出有功功率与无功功率的耦合，逆变器输出的有功功率可以表示为

$$P_e=\frac{3EU_g}{Z}\Delta\delta=\frac{3EU_g}{Z}\int(\omega-\omega_g)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：P_e 为输出电磁功率；E 为逆变器输出端电压的有效值；U_g 为电网端电压的有效值；Z 为逆变器与电网之间的感抗值；ω 为 VSG 输出角频率；ω_g 为电网角频率。VSG 的输出功率主要取决于逆变器与电网的相角差，即逆变器输出角频率与电网角

频率的偏差积分值，而 VSG 主要通过转动惯量与阻尼系数的作用来影响相角差，从而影响输出功率。

结合下垂控制策略，推导出 VSG 模拟同步发电机的有功功率特性方程为

$$\frac{P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}}+D_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{n}}-\omega)=J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{m}}=P_{\mathrm{ref}}+k_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{n}}-\omega) \tag{3}$$

式中：P_{m}为机械功率；D_{p}为阻尼系数；ω_{n}为电网角频率；J为转动惯量；P_{ref}为有功功率给定值；k_{p}为有功下垂系数。下垂控制的存在使得 VSG 具备了模拟同步机输入功率的调整能力，J 和 D_{p}则赋予了 VSG 模拟同步机物理转矩特性的功能。

2 VSG 有功功率的振荡机理分析

对式(1)、式(2)和式(3)进行小信号化处理可以得到 VSG 输出有功功率的小信号传递函数模型，如图 2 所示。图中：ΔP_{ref}为给定参考电磁功率的变化量；$\Delta\omega_{\mathrm{g}}$为电网角频率的波动；输出电磁功率的变化量 ΔP_{e}可以表示为

$$\Delta P_{\mathrm{e}}=\frac{\dfrac{3EU_{\mathrm{g}}}{J\omega_{\mathrm{n}}Z}}{s^2+\dfrac{D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}}}{J\omega_{\mathrm{n}}}s+\dfrac{3EU_{\mathrm{g}}}{J\omega_{\mathrm{n}}Z}}\Delta P_{\mathrm{ref}}-\frac{\dfrac{3EU_{\mathrm{g}}}{J\omega_{\mathrm{n}}Z}(J\omega_{\mathrm{n}}s+D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}})}{s^2+\dfrac{D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}}}{J\omega_{\mathrm{n}}}s+\dfrac{3EU_{\mathrm{g}}}{J\omega_{\mathrm{n}}Z}}\Delta\omega_{\mathrm{g}} \tag{4}$$

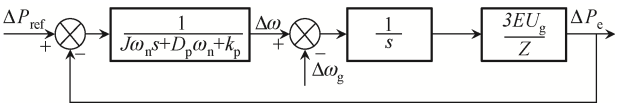


图 2 VSG 有功功率小信号模型

Fig. 2 Small-signal model of VSG active power

ΔP_{e}主要受到 ΔP_{ref}和 $\Delta\omega_{\mathrm{g}}$的影响，而二者的变化往往意味着 VSG 的运行工况发生了变化，同时 ΔP_{ref}和 $\Delta\omega_{\mathrm{g}}$还可能诱发系统有功低频振荡。当有功低频振荡发生时，过流能力弱、阻尼小的逆变器可能会崩溃。为避免崩溃的发生，提高逆变器运行的稳定性，有功低频振荡应该得到抑制。

由式(4)可知，当 ΔP_{ref}和 $\Delta\omega_{\mathrm{g}}$均阶跃变化时，$\Delta P_{\mathrm{e}}$的稳态值 ΔP_{en}为

$$\Delta P_{\mathrm{en}}=\lim_{s\to 0}\Delta P_{\mathrm{e}}=\Delta P_{\mathrm{ref}}-(D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}})\Delta\omega_{\mathrm{g}} \tag{5}$$

可见，由于 D_{p}的存在，VSG 在电网角频率发生波动时，会出现额外附加的稳态偏差分量 γ，其表达式为

$$\gamma=-D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}\Delta\omega_{\mathrm{g}} \tag{6}$$

可见，γ 主要受 D_{p}的影响，且与 $\Delta\omega_{\mathrm{g}}$相关。$\gamma$ 的存在使得 VSG 控制的初值增大或减小，从而进一步提升有功功率低频振荡的可能性，形成恶性循环，同时也会对并联系统的有功功率分配产生不利影响。

由式(4)可知，若忽略 ΔP_{ref}和 $\Delta\omega_{\mathrm{g}}$对应的分子项，二者具有相同的特征方程，且为典型的二阶系统，其自然振荡频率 ω_{nat}和阻尼比 ζ 分别为

$$\omega_{\mathrm{nat}}=\sqrt{\frac{3EU}{J\omega_{\mathrm{n}}Z}} \tag{7}$$

$$\zeta=\frac{(D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}})\sqrt{Z}}{2\sqrt{3EUJ\omega_{\mathrm{n}}}} \tag{8}$$

为进一步讨论 D_{p}和 J 对 VSG 输出有功功率低频振荡的影响，绘制 VSG 有功功率小信号根的轨迹，如图 3 所示。

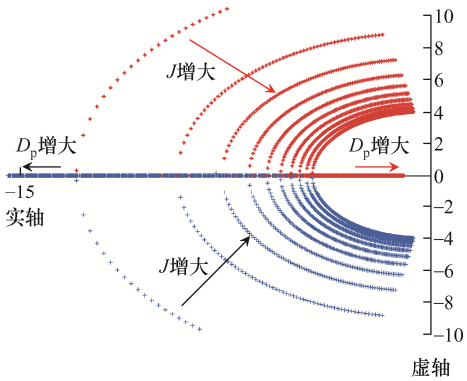


图 3 VSG 有功功率小信号根轨迹图

Fig. 3 Small-signal root locus of VSG active power

当 J 固定、D_{p}较小时，系统存在着 1 对共轭复根，此时系统处于欠阻尼状态，系统对外表现出振荡特性。随着 D_{p}的增大，共轭复根逐渐相交于实轴，且分别向着相反的方向移动，此时系统进入过

阻尼状态，系统对外的振荡特性消失。当 J 增大时，特征根的分离点逐渐接近虚轴，对应系统的动态响应速度变慢，并且随着 J 的增大，在相同 D_p 的作用条件下，系统整体的阻尼不断减小，系统的动态性能及稳定性变差。但是过小的 J 会导致系统的惯性支撑下降，VSG 对电网的支撑作用减弱，故 J 和 D_p 应保持在合理的范围，对 ζ 求取全微分可得

$$\Delta\zeta=\frac{\omega_n\sqrt{Z}}{2\sqrt{3EUJ\omega_n}}\Delta D_p-\frac{(D_p\omega_n+k_p)\sqrt{Z}}{4J\sqrt{3EUJ\omega_n}}\Delta J \quad (9)$$

由 ζ 的全微分可知，阻尼系数的变化率为固定值，即在转动惯量不变的情况下，阻尼系数对 ζ 的影响是线性的，而转动惯量的影响是非线性的，同时对于单个 VSG 系统，J 一般较小，从而导致 J 的变化相较于 D_p 的变化对 ζ 的影响更大，即改变 J 相较于改变 D_p 更容易抑制有功功率的低频振荡。为进一步分析这种影响，绘制 ζ 与 J 和 D_p 的关系曲面如图 4 所示。

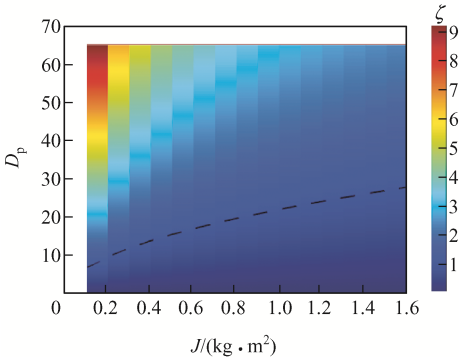


图 4　ζ 关于 J 与 D_p 的关系曲面图

Fig. 4 Surface diagram of the relationship between J and D_p about ζ

如图 4 所示，临界阻尼分界线将整个曲面分成了欠阻尼和过阻尼 2 个部分。当 D_p 取某一定值时，以横向视角观察曲面，在 J 的变化过程中，会导致曲面颜色发生较大程度的变化，即 ζ 会有较大的变化；当 J 取某一固定值时，以纵向视角观察曲面，在 D_p 的变化过程中，曲面颜色会发生一定程度的变化，且随着 J 的减小，曲面颜色的变化越明显，即 ζ 的变化越明显。结合式(9)和图 4 可知，对于 VSG 系统，改变 J 相较于改变 D_p 更容易抑制有功功率的低频振荡；由式(6)可知，减小 D_p 则更有利于减小有功功率的稳态偏差。

为了使 VSG 在不同的运行工况有着不同的运行特性。在电网角频率波动或给定电磁功率发生变化时，J 和 D_p 根据给定的变化程度来动态调节 VSG 的 ζ 状态，从而减少有功低频振荡发生的可能性；当 VSG 接近新的稳态点时，J 和 D_p 可根据新的运行工况进行调整，从而提高 VSG 有功功率的主动支撑能力。

3　功率动态划分的自适应策略

J 和 D_p 对 VSG 输出有功功率的稳定有着极其重要的作用。在传统的控制策略中，J 与 D_p 的取值固定，VSG 的动态特性被限制在某一范围内，从而对系统的动态稳定性和有功功率支撑产生极大的局限性。为提高 VSG 系统的动态稳定特性和有功功率支撑能力，本文提出基于功率动态划分的自适应 VSG 控制策略，其对应 J 与 D_p 的表达式分别为

$$\begin{cases} J_1=\left(\dfrac{|\Delta P_e|}{P_n\Delta t}-k_{thred}\right)k_1 & \dfrac{|\Delta P_e|}{P_n\Delta t}-k_{thred}>0 \\ J_2=\left(\dfrac{|\Delta P_e|}{P_n\Delta t}-k_{thred}\right)k_2 & \dfrac{|\Delta P_e|}{P_n\Delta t}-k_{thred}\leqslant 0 \\ J_3=\int(J_1+J_2)\mathrm{d}t \\ J=J_n-J_3 \end{cases} \quad (10)$$

$$D_p=D_{pn}\left(\frac{k_D|\Delta P_e|}{P_n\Delta t}\right) \quad (11)$$

式中：P_n 为额定有功功率；k_{thred} 为速率阈值；k_1 为加速系数；k_2 为减速系数；J_1、J_2、J_3 为中间变量；J_n 为额定转动惯量；D_{pn} 为额定阻尼系数；k_D 为阻尼系数速率。将式(10)代入式(4)和式(5)中可以得到新的稳态偏差分量值 γ 为

$$\gamma=-D_p\omega_n\Delta\omega_g+[J_1(s)+J_2(s)]\omega_n\Delta\omega_g|_{s=0} \quad (12)$$

式中，$J_1(s)$和 $J_2(s)$分别为 J_1 和 J_2 在 s 域中的表达式，J 中积分部分的存在使得有功功率稳态偏差出现了附加量，但是在实际控制过程中，因为限幅环节的作用会使得 $J_1(s)$和 $J_2(s)$最终均等于 0，

即因动态自适应速率带来的稳态调整偏差最终会自动消失。采用动态自适应速率的 VSG 有功功率支撑策略后，J 和 D_p 均为动态变化量，其变化程度将影响 VSG 的动态特性，而 ζ 是影响 VSG 动态特性的直接因素。以某一段 VSG 功率变化特性为例绘制 ζ 与式(10)和式(11)中参数的关系曲线，如图 5 所示。

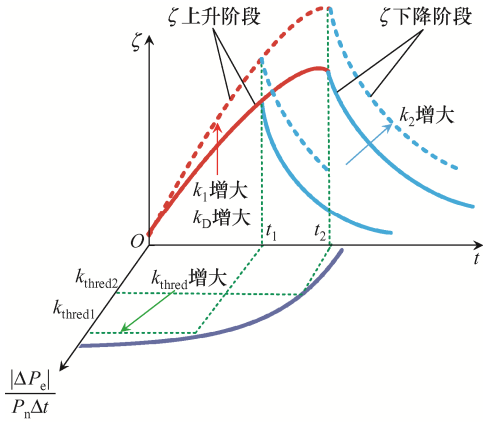


图 5 ζ 与各控制参数关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between ζ and each control parameter

在 VSG 功率上升过程中，一开始功率变化较为剧烈，在控制器的作用下随着时间的推移，功率的变化逐渐趋于平稳，即功率变化率接近 0。选取不同的 k_{thred} 决定 ζ 的上升和下降时间，较低的 k_{thred} 导致 ζ 的上升时间较长，从而使得 VSG 具有较长时间的高阻尼比作用，提高了 VSG 的动态稳定性，但是过低的 k_{thred} 会导致在功率变化率的波动较小时，J_1 出现振荡，从而诱发系统振荡，破坏系统的稳定性，因此 k_{thred} 的选取需要适度。k_1 和 k_D 共同决定了 ζ 的上升速率，k_2 和 k_D 则共同决定了 ζ 的下降速率，ζ 的上升代表着扰动刚刚发生，系统需要快速控制。k_1 的值可以适当选大一些，即依据式(10)并参考实际系统，k_1 的选择可以使得控制器在 3~5 个控制周期内到达 J 的限幅值。ζ 的下降过程则代表着 VSG 趋于稳定，在这个过程中功率变化率变化较小，完全平稳地趋于 0 需要一定的时间。为防止控制器的误动作，k_2 和 k_D 的值可以适当地选小一点，结合实际控制系统需要，k_2 和 k_D 的选择可以使得控制器在十几甚至几十个控制周期内达到 J 与 D_p 的限幅值。

无论 VSG 处于何种运行状态，当运行工况发生变化时，P_e 都会发生对应的上升或下降变化。以功率上升的情况为例说明功率动态区域划分的作用原理，如图 6 所示。

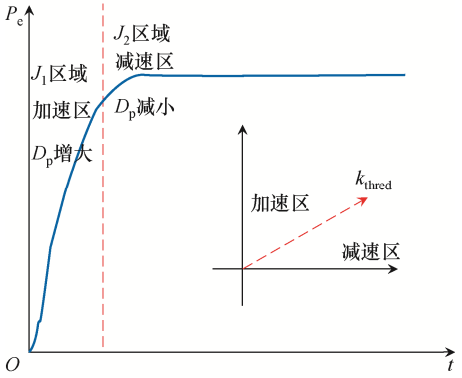


图 6 功率动态区域划分的作用原理

Fig. 6 Principle of power dynamic region division

以 k_{thred} 为分界线，根据 P_e 变化率绝对值的大小将功率动态区域分为了加速区与减速区，即 VSG 时刻处于这 2 种情况。当 VSG 处于加速区时，J_1 起主要作用，此时对应的 J_3 在累积增大，且增大的速率主要取决于 k_1，随着 J_3 的增大，VSG 的 J 不断减小。在加速区中，因 P_e 变化率的绝对值足够大，所以此时的 D_p 也处于增大状态，那么在整个加速区中，VSG 的 ζ 处于增大的状态，这有助于避免有功低频振荡的发生。

当 VSG 处于减速区时，VSG 往往正在或已经处于新的稳定状态，在 VSG 即将到达新的稳定状态时，J_2 起主要作用，此时对应的 J_3 在累积减小，且减小的速率主要取决于 k_2，随着 J_3 的减小，VSG 的 J 不断增大。因电磁功率变化率的绝对值较小，此时的 D_p 也处于减小状态，D_p 的减小有助于有功功率稳态偏差的减小。在 VSG 到达新的稳定状态后，P_e 变化率的绝对值达到最小，J_3 会进一步减小直到 J=J_n，从而使附加稳态量消失，此时在 k_D 的作用下 D_p 也接近 0，有功的稳态偏差达到最小值，VSG 在新的稳态工作点保持动态平衡。以功率上升的情况为例，采用自适应 VSG 控制策略后，对应的 ζ 变化曲线如图 7 所示。

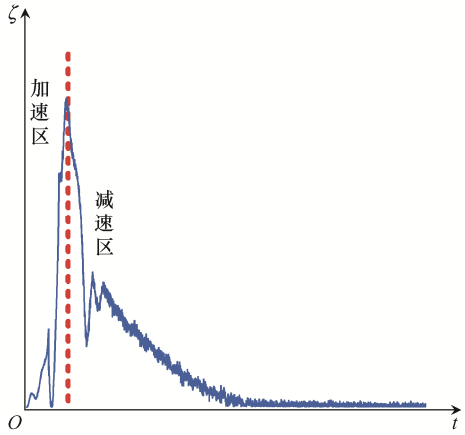


图 7　ζ 依据自适应 VSG 控制策略的变化曲线

Fig. 7 ζ Variation curve of ζ with the adaptive VSG control strategy

当 VSG 处于加速区时，伴随着 J 的减小、D_p 的增大，VSG 的 ζ 快速增大，其增大速率取决于 k_1 和 k_D，此时在高阻尼比的作用下，VSG 的动态特性得到改善，P_e 变化率逐步减小，VSG 从加速区逐步过渡到减速区；当 VSG 处于减速区时，伴随着 J 的增大、D_p 的减小，VSG 的 ζ 逐步减小，其减小速率取决于 k_2 和 k_D。

可见，利用功率动态区域划分对 J 和 D_p 进行自适应控制以后，J 和 D_p 会以动态的参数运行。当功率变化率急速增大或减小时，J 随着功率变化率及 k_1 的选取逐步减小，D_p 逐步增大，从而抑制 VSG 有功功率低频振荡的产生。当功率变化率减小或趋于平稳时，J 会随着功率变化率以及 k_2 的选取逐步增大，D_p 逐步减小，甚至趋向于 0，从而降低 VSG 发生有功低频振荡的可能性，同时保持较小的有功稳态偏差。

4　系统仿真与分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 1 所示的系统仿真模型，仿真时长为 3 s，且在 1~2 s 期间，电网频率降低 0.1 Hz。部分仿真参数见表 1。

采用表 1 所列的参数进行仿真，并模拟 3 种运行工况，其仿真效果如图 8 所示。图中：J_n 和 D_{pn} 表示转动惯量和阻尼系数均采用额定值；J 和 D_{pn} 表示转动惯量采用动态系数、阻尼系数采用额定值；J 和 D_p 表示转动惯量和阻尼系数均采用动态系数。

表 1　部分仿真参数

Tab. 1 Partial simulation parameters

参数	数值
额定功率 P_n/kW	10
额定阻尼系数 D_{pn}	12
额定转动惯量 J_n	1.6
加速系数 k_1	30
额定功率 f/Hz	50
阻尼系数速率 k_D	0.26
速度阈值 k_{thred}	4
减速系数 k_2	0.8

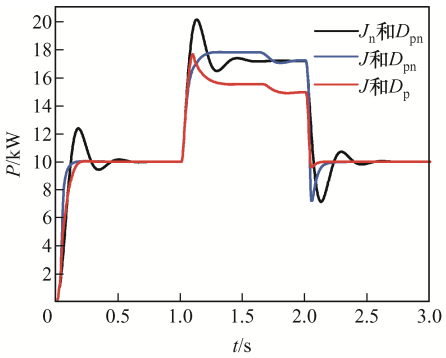


图 8　VSG 有功功率支撑效果图

Fig. 8 Active power support effect of VSG

如图 8 所示，当转动惯量与阻尼系数均采用额定值时，VSG 出现了有功低频振荡，系统存在较大冲击的同时，也带有较大的有功稳态偏差。VSG 运行在这种工况时，过流能力弱、阻尼小的逆变器容易发生崩溃，将极大地影响系统运行的安全性与稳定性。

当阻尼系数采用额定值、转动惯量采用动态系数时，VSG 在功率变化的过程中，ζ 增大，实现了有功低频振荡的抑制功能，有效提高了 VSG 运行的稳定性。伴随着减速系数的作用，J 逐渐与 J_n 相等，从而促使附加有功偏差的消失。但因为阻尼系数的存在，所以有功功率偏差始终存在。因此，仅对转动惯量进行自适应控制无法消除有功功率的稳态偏差，且当作用时间较短、新的稳态工作点与当前稳态工作点差距不大时，会导致系统无法提供

足够的阻尼。因此，仅对 J 进行自适应还存在着不足之处，需要配合 D_p 的作用。

当阻尼系数与转动惯量均采用动态系数时，VSG 的低频有功功率振荡得以消除，且 VSG 的稳态有功功率偏差得到消除，极大程度地提高了系统的安全性与稳定性。但是在控制过程中也会存在有功功率稳态调整误差，这是因为在 VSG 逐渐趋于稳定的过程中，功率变化率变化较小，完全平稳地趋于 0 需要一定的时间，在变化率趋于 0 后，$J_1(s)$ 和 $J_2(s)$均等于 0，D_p 也趋于 0，体现在仿真效果中便是在控制过程中会存在一定的有功功率稳态调整误差，但是在控制完全平稳后，有功功率稳态调整误差消失。

当系统处于电网角频率发生变化的工况时，有功功率的动态特性最为复杂，若不加以控制，VSG 将存在较大的有功功率超调与稳态功率偏差。动态参数的引入使得 VSG 在 P_e 变化较大时提供较大的 ζ，在系统即将到达新的稳态点时，D_p 自适应地减小，J 自适应地增大，使得 VSG 在进入新的稳态工作点时极大程度地减小有功稳态偏差。参数的动态调整过程如图 9 所示。

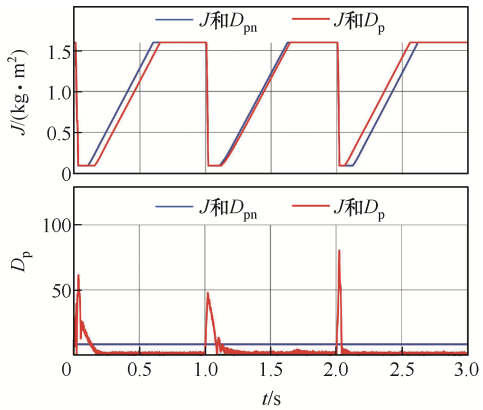


图 9 J 和 D_p 动态调整过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the dynamic adjustment process J and D_p

可见，在加速过程中，k_1 的作用使得 J_1 随着功率变化率的增大而增大，从而导致 J_3 的快速增大，引发的结果便是 J 的减小及 D_p 的增大，进而导致系统的阻尼迅速增大。当系统的阻尼增大到一定程度后，P_e 的变化率开始减小，直至小于 k_{thred}，J_1 退出作用。在 k_2 的作用下，J_2 为负值，J_3 开始减小，从而导致 J 增大，系统的阻尼减小，系统开始进入趋于稳态的过程。此时，因控制策略带来的有功功率稳态调整偏差依旧存在，但随着系统趋于稳定，$J_1(s)$、$J_2(s)$和 D_p 均趋于 0，有功功率稳态调整偏差也随之消失，从而最终达到抑制有功功率振荡的同时减小有功功率稳态偏差的目的。

5 结论

并网逆变器采用传统的 VSG 控制策略会不可避免地给系统带来有功功率低频振荡与稳态有功功率偏差问题，从而影响电网的安全稳定运行。本文通过系统分析 VSG 的运行机理，发现转动惯量与阻尼系数会影响有功功率的低频振荡与稳态有功功率偏差。为了在满足 VSG 动态特性的同时消除稳态有功功率偏差，本文提出基于功率动态区域划分的自适应 VSG 控制策略。

根据功率变化率的大小，将整个动态区域划分为加速区与减速区，通过在加速区快速减小转动惯量与增大阻尼系数来增大系统的整体阻尼，从而保证了 VSG 的动态稳定性。当功率的变化趋于平稳时，系统将自动进入减速区，为防止系统发生误判，VSG 在减速区内阻尼系数减小，转动惯量缓慢增大，在系统完全稳定后，阻尼系数趋于 0，转动惯量也不再变化，系统的有功功率稳态偏差消失。

本文所提的功率动态区域划分的自适应 VSG 控制策略对转动惯量与阻尼系数均采用自适应控制，使得 VSG 在不同的工况都有良好的参数特性，在有效抑制有功低频振荡的同时，也极大程度地减小了有功功率稳态偏差，提高了 VSG 的有功功率支撑能力，保障了系统的运行安全与稳定。但是在加速区与减速区的划分及各参数的优化设计、特性分析等方面仍具备进一步提升的空间，这也是未来工作的努力方向。

参考文献：

[1] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.
Wang Bo, Yang Deyou, Cai Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006. (in Chinese)

[2] 刘欣, 郭志博, 贾焦心, 等. 基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4130-4146.
Liu Xin, Guo Zhibo, Jia Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146. (in Chinese)

[3] 李子龙, 匡洪海, 徐雨溪, 等. 碳交易机制下考虑液态 CO_2 储能的微电网双层优化调度[J]. 电源学报, 2026, 24(3): 100-110.
Li Zilong, Kuang Honghai, Xu Yuhao, et al. Two-layer optimal scheduling of microgrids considering liquid CO_2 energy storage under carbon trading mechanism [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 100-110. (in Chinese)

[4] 王倩, 孙大卫, 盛四清, 等. 内禀自同步虚拟同步发电机对系统低频振荡特性的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 410-418.
Wang Qian, Sun Dawei, Sheng Siqing, et al. Effect of virtual synchronous generator on low frequency oscillation characteristics of system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(12): 410-418. (in Chinese)

[5] Du Wenjuan, Fu Qiang, Wang H F. Power system small-signal angular stability affected by virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3209-3219.

[6] 颜湘武, 刘正男, 张波, 等. 具有同步发电机特性的并联逆变器小信号稳定性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 910-917.
Yan Xiangwu, Liu Zhengnan, Zhang Bo, et al. Small-signal stability analysis of parallel inverters with synchronous generator characteristics [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 910-917. (in Chinese)

[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. (in Chinese)

[8] 刘家文, 侯川川, 朱淼, 等. 基于虚拟同步机的构网逆变器三相不平衡功率波动抑制[J]. 电源学报, 2026, 24(3): 178-189.
Liu Jiawen, Hou Chuanchuan, Zhu Miao, et al. Three-phase unbalanced power fluctuation suppression of grid-forming inverter based on VSG [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 178-189. (in Chinese)

[9] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

[11] Yu Yun, 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.

[12] Zhou Xinyi, Cheng Shu, Wu Xun, et al. Influence of photovoltaic power plants based on VSG technology on low frequency oscillation of multi-machine power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5376-5384.

[13] 张亚楠, 朱淼, 张建文, 等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. 电源学报, 2016, 14(3): 11-19.
Zhang Yanan, Zhu Miao, Zhang Jianwen, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on

adaptive adjusting for distributed inverters [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 11-19. (in Chinese)

[14] Meng Jianhui, Wang Yi, Peng Jialin, et al. Flexible virtual synchronous generator control for distributed generator with adaptive inertia [J]. Electric Power Components and Systems, 2019, 47(1-2): 128-140.

[15] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1462-1471.

[16] Li Dongdong, Zhu Qianwei, Lin Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.

[17] 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 Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(7): 1918-1926. (in Chinese)

[18] 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. (in Chinese)



智明

作者简介：

智明(1980—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配网调控运行管理。E-mail：78901574@qq.com。

杨飞(1989—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统调度控制，配电自动化运行控制。E-mail：yangfei2932@163.com。

刘东亮(1978—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配网供电质量提升控制。E-mail：liudongliangtz@163.com。

邹杰(1983—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配网运营管控，配电自动化。E-mail：66501406@qq.com。

程鹏(1989—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配网调控运行。E-mail：chengpeng@js.sgcc.com.cn。

杨飞(1997—)，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：配电网电力电子，新能源稳定并网运行与控制。E-mail：dky_yf@163.com。

(责任编辑：孙美菊)