DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.59 中图分类号：TM46 文献标志码：A

基于暂态阻尼提升的VSG并联系统低频功率振荡分散式协调抑制策略

苏 灿[1,2]，王 磊[1,2]，周 文[1,2]，程子玮[1,2]，张润涛[1,2]，岑宝仪[3]
(1.国网河北能源技术服务有限公司，石家庄 050000；2.河北省能源互联网仿真建模与控制重点实验室，石家庄 050000；3.深圳市中电电力技术股份有限公司，深圳 518040)

摘要：虚拟同步发电机VSG (virtual synchronous generator)在模拟同步发电机特性以提供惯性和阻尼的同时，也不可避免地引入了同步发电机的转子振荡特性，特别是在VSG并联运行的系统中，当系统遭受扰动时，易引发功率振荡的问题，严重时甚至会损坏电力电子设备。针对此问题，基于状态反馈和极点配置理论，提出了基于暂态阻尼提升的VSG并联系统功率振荡分散式协调抑制策略，通过构建基于角频率高频分量补偿和基于电磁功率高频分量补偿的组合，提升系统的暂态阻尼，抑制系统的功率振荡，且不影响系统的稳态特性。然后，通过构造李雅普诺夫能量函数的方法证明了所提控制策略的稳定性。最后，通过仿真验证了所提方法的有效性。

关键词：虚拟同步发电机；功率振荡；状态反馈；极点配置；暂态阻尼；李雅普诺夫能量函数

Decentralized Coordinated Suppression Strategy for Low-frequency Power Oscillation in VSG Parallel Systems Based on Transient Damping Enhancement

SU Can[1,2], WANG Lei[1,2], ZHOU Wen[1,2], CHENG Ziwei[1,2], ZHANG Runtao[1,2], CEN Baoyi[3]
(1. State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2. Hebei Key Laboratory of Simulation Modeling and Control for Energy Internet, Shijiazhuang 050000, China; 3. CET Electric Technology Inc., Shenzhen 518040)

Abstract: The virtual synchronous generator (VSG) simulates the characteristics of synchronous generators to provide inertia and damping, but inevitably introduces the rotor oscillation characteristics of synchronous generator. Especially in VSG parallel operation systems, when the system is disturbed, it is prone to cause power oscillation problems, which may even damage power electronic equipment. To address this issue, based on state feedback and pole-placement theory, a power oscillation decentralized coordinated suppression strategy for VSG parallel systems based on transient damping enhancement is proposed. By constructing a combination of angular frequency high-frequency component compensation and electromagnetic power high-frequency component compensation, the transient damping of the system is improved, and power oscillation is suppressed without affecting the system steady-state characteristics. Then, the stability of the proposed control strategy is demonstrated by constructing a Lyapunov function. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation.

Keywords: Virtual synchronous generator; power oscillation; state feedback; pole-placement; transient damping; Lyapunov function

收稿日期：2024-04-01；**修回日期：**2024-05-14；**录用日期：**2024-06-23；**网络首发日期：**2024-07-17
基金项目：国网河北能源技术服务有限公司科技资助项目(TSS2023-06)
This work is supported by the State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd. Science and Technology under the grant TSS2023-06

随着以逆变器为接口的分布式新能源单元在微电网中的渗透率日益提高，微电网低惯量、弱阻尼的特性愈发凸显，给系统稳定运行带来了巨大挑

战[1-2]。目前，虚拟同步发电机 VSG(virtual synchronous generator)控制技术因能模拟同步发电机 SG (synchronous generator)的运行特性、具有改善系统惯量和阻尼水平的潜力而备受关注[3]。然而，由于 VSG 模拟了 SG 的转子运动方程，不可避免地引入了 SG 的功率振荡特性，尤其在多个 VSG 并联的系统中，系统功率振荡更加剧烈[4]。由于电力电子设备的过流能力弱，因此当系统面临负荷突变时，剧烈的功率振荡甚至会导致电力电子设备损坏，进而可能危害系统的稳定运行。

对于多 VSG 并联的低频功率振荡问题，国内外学者进行了大量的研究。文献[5]通过引入锁相环构建阻尼反馈功率，用于模拟同步发电机的阻尼转矩，改善系统的阻尼特性，从而抑制功率振荡。然而，也会不可避免地引入和锁相环相关的稳定性问题。文献[6-10]通过引入虚拟阻抗控制方法来改善系统阻尼特性，从而抑制系统低频功率振荡。然而，此方法的有效性在很大程度上取决于虚拟阻抗控制参数的匹配程度。由于线路阻抗在实际应用中难以获取，因此难以准确设计虚拟阻抗，不合适的虚拟阻抗甚至会加剧功率振荡。文献[11-12]借鉴了用于抑制低频振荡的电力系统稳定器 PSS(power system stabilizer)的工作原理，提出了类似 PSS 的低频功率振荡抑制策略，通过构建关于角频率偏差的附加阻尼信号并引入到无功控制回路来抑制系统功率振荡，但是上述方法存在控制器设计过程复杂、参数整定困难等问题。

除上述方法外，一些学者提出借助通信解决功率振荡问题。文献[13-14]提出了一种基于中心频率的控制方法，通过采用集中式通信方式来获得中心频率以抑制功率振荡。然而，集中式控制过于依赖微电网中央控制器，一旦存在通信故障，就可能会造成系统崩溃，且缺乏灵活性和扩展性。为减小通信负担，文献[15-17]提出采用分布式方式来抑制功率振荡。文献[15]提出了一种基于分布式通信的互阻尼控制方法，通过相邻 VSG 之间进行通信，利用互阻尼控制模块来实现功率振荡抑制；文献[16]采用分布式通信架构，考虑非理想通信情况，提出了一种基于一致性算法的功率振荡抑制策略；文献[17]提出了一种多 VSG 低频功率振荡抑制方法，通过采用低带宽通信，并基于事件触发的通信机制阻尼多 VSG 的低频功率振荡。然而，分布式控制依然需要依赖通信，通信包丢失和通信中断均可能影响系统的稳定性。无论是采用集中式还是分布式，都需要依赖通信，这无疑会增加系统的通信成本和系统的复杂性，此外，通信延时和通信故障也会给系统的鲁棒性带来负面影响。

针对上述问题，本文从状态反馈理论出发，借鉴极点配置思想，提出一种基于暂态阻尼提升的 VSG 并联系统低频功率振荡分散式协调抑制策略，通过构建基于角频率高频分量补偿和基于电磁功率高频分量补偿的组合，以分散式形式提升系统的暂态阻尼和抑制系统的功率振荡，且不影响系统的稳态特性。本文首先建立 VSG 并联系统模型并分析低频功率振荡机理；然后提出 VSG 并联系统的暂态阻尼提升控制策略，从极点配置角度揭示所提控制方法的本质；之后，构建了李雅普诺夫能量函数，利用李雅普诺夫定理分析了所提控制下的系统稳定性；最后，通过仿真和传统控制方法进行对比，验证本文所提控制方法的有效性。

1 VSG 并联系统低频功率振荡机理分析

1.1 VSG 控制原理

图 1 为 VSG 控制原理。图中：L_{f} 和 C_{f} 为 LC 滤波器的滤波电感和滤波电容；L_{l} 为线路阻抗；i_{L} 为 VSG 的逆变器侧输出电流；i_{o} 为 VSG 的输出电流；u_{o} 为 VSG 的输出电容两侧电压；PCC 为公共连接点；P_{m} 和 P_{e} 分别为 VSG 的机械功率和输出有功功率；J_{ω} 和 D_{p} 分别为 VSG 的惯性系数和阻尼系数；ω 和 ω_0 分别为 VSG 的输出角频率和额定值；θ 为转子角度；Q_{ref} 和 Q_{e} 分别为 VSG 的无功功率给定值和输出无功功率；D_{q} 和 K_{q} 分别为无功下垂系数和无功惯性系数；U_{nom}、U_{o} 和 E 分别为 VSG 的额定电压、输出电压和内电势的有效值。

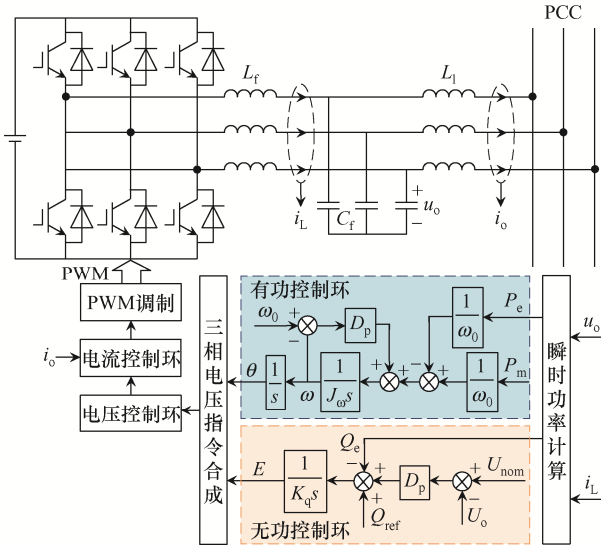


图 1　VSG 控制原理

Fig. 1 VSG control schematic

本文重点研究 VSG 并联系统低频有功功率振荡的问题。根据图 1 可知，VSG 有功控制环的数学表达式为

$$P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}-D_{\mathrm{p}}\omega_0(\omega-\omega_0)=J_{\omega}\omega_0\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

1.2 VSG 并联系统建模和低频功率振荡机理分析

图 2 为 n 台 VSG 并联的简化结构。图中：X_{si} 为 VSGi 的输出感抗(i=1, 2, ⋯, n)；X_{li} 为 VSGi 连接到 PCC 点之间的线路感抗；E_i 和 δ_i 为 VSGi 的输出电压和相角；U_{g} 为公共连接点电压；ω_i 和 ω_{g} 为 VSGi 输出角频率和交流母线角频率；P_{ei} 为 VSGi 的输出有功功率，可以描述为

$$P_{ei}=3\frac{E_iU_{\mathrm{g}}\delta_i}{X_{ti}}=K_i\delta_i=K_i\frac{\omega_i-\omega_{\mathrm{g}}}{s} \tag{2}$$

式中：X_{ti} 为第 i 个支路中 VSGi 的输出感抗和对应支路线路感抗之和，即 $X_{ti}=X_{si}+X_{li}$；K_i 为同步系数。

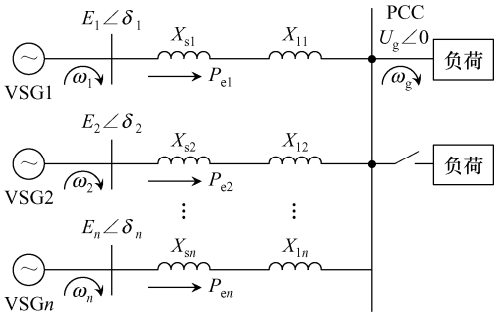


图 2　VSG 并联系统简化拓扑结构

Fig. 2 Simplified topology of VSG parallel system

由图 2 根据能量守恒原理可得

$$\sum_{i=1}^{n}P_{ei}=P_{\mathrm{load}} \tag{3}$$

式中，P_{load} 为负荷有功功率。

对式(1)~式(3)进行线性化处理，得到小信号模型为

$$\begin{cases}\Delta\omega_i=-\dfrac{K_i}{J_{\omega i}\omega_0s^2+D_{\mathrm{p}i}\omega_0s+K_i}\Delta\omega_{\mathrm{g}}=G_{\omega i}\Delta\omega_{\mathrm{g}}\\ \Delta P_{ei}=-\dfrac{K_i(J_{\omega i}\omega_0s+D_{\mathrm{p}i}\omega_0)}{J_{\omega i}\omega_0s^2+D_{\mathrm{p}i}\omega_0s+K_i}\Delta\omega_{\mathrm{g}}=\\ \qquad -(J_{\omega i}\omega_0s+D_{\mathrm{p}i}\omega_0)G_{\omega i}\Delta\omega_{\mathrm{g}}\\ \Delta\omega_i=-\dfrac{G_{\omega i}}{\sum\limits_{j=1}^{n}G_{\omega j}(J_{\omega j}\omega_0s+D_{\mathrm{p}j}\omega_0)}\Delta P_{\mathrm{load}}\end{cases} \tag{4}$$

式中，s 为拉普拉斯变换中的复频率变量；$G_{\omega i}$ 为 VSGi 的角频率–母线角频率传递函数；j 表示第 j 个支路的 VSG。

根据式(4)可得 ΔP_{ei} 与 ΔP_{load} 的频域表达式为

$$\frac{\Delta P_{ei}}{\Delta P_{\mathrm{load}}}=\frac{(J_{\omega i}\omega_0s+D_{\mathrm{p}i}\omega_0)G_{\omega i}}{\sum\limits_{j=1}^{n}G_{\omega j}(J_{\omega j}\omega_0s+D_{\mathrm{p}j}\omega_0)} \tag{5}$$

结合式(5)可知，当系统负荷扰动时，VSG 输出有功功率的特性主要受惯性系数、阻尼系数及线路阻抗参数的影响。为了方便分析，本文以 2 个 VSG 并联的系统为例，研究不同参数对系统功率振荡的影响机理。

图 3 为 $J_{\omega1}$ 变化时系统的极点分布。由图可知，系统存在 1 对共轭极点，且随着 $J_{\omega1}$ 的增加，该共轭极点对逐渐靠近虚轴，系统阻尼减小，易出现功率振荡。

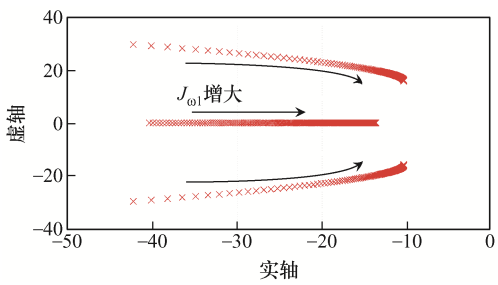


图 3　$J_{\omega1}$ 变化时系统的极点分布

Fig. 3 Pole distribution when $J_{\omega1}$ changes

图 4 为 D_{p1} 变化时系统的极点分布。由图可知，系统依旧存在 1 对共轭极点，且随着 D_{p1} 的增加，该共轭极点对向左移动并远离虚轴，系统阻尼增大，能够有效抑制功率振荡。此外，随着 D_{p1} 的增加，系统的自然振荡频率略减小。

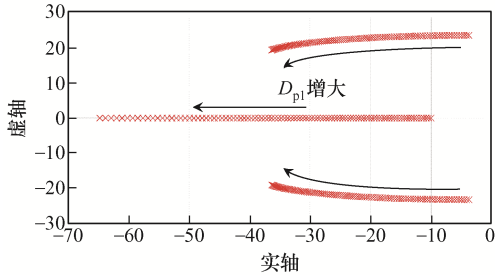


图 4 D_{p1} 变化时系统的极点分布

Fig. 4 Pole distribution when D_{p1} changes

图 5 为 X_{t1} 变化时系统的极点分布。如图 5 所示，当 X_{t1} 增大时，系统的 1 对共轭极点几乎以垂直趋势不断靠近负实轴，系统阻尼增大，有利于抑制功率振荡。

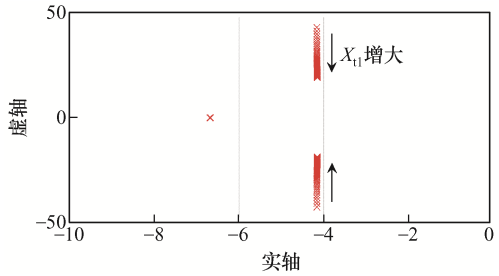


图 5 X_{t1} 变化时系统的极点分布

Fig. 5 Pole distribution when X_{t1} changes

综上所述，可以通过减小惯性系数、增加阻尼系数或者增加等效感抗来增加系统阻尼，提升系统对低频功率振荡的抑制能力。然而，为了保证频率的稳定性，通常惯性系数不宜选取过小，且增加阻尼系数会影响系统的稳态特性。由于惯性系数和阻尼系数对动态和暂态特性相互制约，无法兼顾动态特性和静态指标的双重需求，因此不宜通过改变惯性系数和阻尼系数来抑制低频功率振荡。此外，通过虚拟阻抗的方式增加等效感抗会不可避免地影响系统的无功分配，且由于线路阻抗参数不易获取，因此可能导致虚拟阻抗参数设置不合理，甚至会加剧系统有功功率振荡[18]。

2 VSG 并联系统的暂态阻尼提升控制策略

根据上述分析可知，共轭极点对的存在是导致系统低频功率振荡的主要原因。本文基于现代控制理论中的极点配置思想，提出一种暂态阻尼提升控制策略，能以分散式形式抑制 VSG 并联系统的低频功率振荡，且不会影响稳态特性。

2.1 暂态阻尼提升控制策略

为了提升系统的暂态阻尼，抑制系统低频功率振荡，在式(1)中增加了补偿项 u，则 VSG 的有功控制环可以表示为

$$P_m - P_e - D_p\omega_0(\omega-\omega_0)+u = J_\omega\omega_0\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

将式(6)进行变换，那么 VSG 的输出功率可表示为

$$P_e = P_m + D_p\omega_0^2 + u - J_\omega\omega_0\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} - D_p\omega_0\omega = P_m + D_p\omega_0(\omega_0+\omega_s) + u - \left(J_\omega\omega_0\dot{\omega} + D_p\omega_0\int\dot{\omega}\mathrm{d}t\right) \tag{7}$$

式中，ω_s 为初始值，是 1 个常数。

式(7)中第 2 个等号右边第一项和第二项均为常数，u 和角频率导数 $\dot{\omega}$ 为变量。因此从数学角度理解可知，VSG 的输出有功功率 P_e 可认为是 1 个关于 u 和 $\dot{\omega}$ 的函数。将式(7)进行线性化，可得其小信号模型在频域的表达式为

$$\Delta P_e(s) = \Delta u(s) - \left(J_\omega\omega_0 + \frac{D_p\omega_0}{s}\right)\Delta\dot{\omega}(s) \tag{8}$$

因此，根据式(8)可知，VSG 的输出有功功率特性由 $\dot{\omega}(s)$ 和 $u(s)$ 的极点决定。若要 VSG 的输出有功功率不存在振荡，则需要 $\dot{\omega}(s)$ 和 $u(s)$ 的极点都为负实极点。此外，为了不影响 VSG 的稳态特性，在稳态时 $u(s)$ 应该为 0。

由式(8)还可知，在不改变 J_ω 和 D_p 的前提下，可以通过调整 $u(s)$ 来实现有功功率振荡抑制，因

此下面从极点配置角度揭示所提控制策略的物理意义。

2.2 所提控制体现的极点配置思想

将式(7)进行线性化，并将所得的小信号表达式求导，可得

$$\Delta\dot{P}_{\mathrm{e}}=\Delta\dot{u}-(J_{\omega}\omega_0\Delta\ddot{\omega}+D_{\mathrm{p}}\omega_0\Delta\dot{\omega}) \tag{9}$$

式中，物理量前面的“Δ”表示该物理量的小信号表达式。

将 $\Delta\dot{\omega}$ 和 $\Delta\dot{u}$ 看成 2 个状态变量。引入中间变量控制信号 γ 并定义为

$$\Delta\gamma=\Delta\dot{u} \tag{10}$$

ΔP_{e} 包含了实际扰动的信息，可将 ΔP_{e} 当成第 3 个状态变量。综合式(7)、式(9)和式(10)可得

$$\begin{bmatrix}\Delta\ddot{\omega}\\ \Delta\dot{u}\\ \Delta\ddot{P}_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{-D_{\mathrm{p}}}{J_{\omega}} & 0 & \dfrac{-1}{J}\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot{\omega}\\ \Delta u\\ \Delta\dot{P}_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{1}{J}\\ 1\\ 0\end{bmatrix}\Delta\gamma+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1\end{bmatrix}\Delta\ddot{P}_{\mathrm{e}} \tag{11}$$

式中，$J=J_{\omega}\omega_0$。

根据式(11)可知，可将 $\Delta\gamma$ 视为输入，根据状态反馈理论，中间变量控制信号 $\Delta\gamma$ 可定义为

$$\Delta\gamma=-[\lambda_1\quad\lambda_2\quad\lambda_3][\Delta\dot{\omega}\quad\Delta u\quad\Delta\dot{P}_{\mathrm{e}}]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中，λ_1、λ_2、λ_3 均为反馈增益。

结合式(10)和式(12)，可得

$$\Delta u=\frac{-\lambda_1 s}{\lambda_2+s}\Delta\omega+\frac{-\lambda_3 s}{\lambda_2+s}\Delta P_{\mathrm{e}} \tag{13}$$

式(13)中等号右边第一项为提取角频率的高频分量，第二项为提取有功功率的高频分量。因此，所提控制的物理本质为将角频率的高频分量和有功功率的高频分量进行组合。可将式(13)改写为更直观和通用的形式，即

$$\Delta u=\frac{-\lambda_1 s}{\lambda_2+s}\Delta\omega+\frac{-\lambda_3 s}{\lambda_4+s}\Delta P_{\mathrm{e}} \tag{14}$$

式(14)中等号右边的 2 个负号均可以在控制框图中表示为“减去”。因此，可进一步得到

$$u=\frac{-\lambda_1 s}{\lambda_2+s}\omega+\frac{-\lambda_3 s}{\lambda_4+s}P_{\mathrm{e}} \tag{15}$$

值得一提的是，当系统达到稳态时，补偿项 u 变为 0，因此所提控制策略不会影响系统的稳态　特性。

本文所提控制策略的控制框图如图 6 所示。本文所提控制策略完全摆脱了对通信的依赖，为典型的分散式形式，克服了现有集中式和分布式低频功率振荡抑制方法需要依赖通信的问题，提高了系统的灵活性和扩展性。

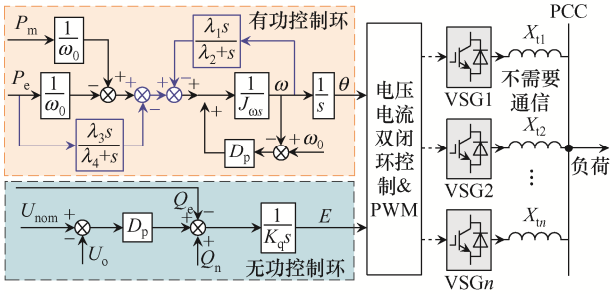


图 6　所提暂态阻尼提升控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of the proposed transient damping enhancement control strategy

2.3 稳定性分析

本节基于李雅普诺夫稳定性定理，研究采用本文所提暂态阻尼提升控制策略下 VSG 并联系统的稳定性。根据式(6)、式(15)和图 6，并令 $D=D_{\mathrm{p}}\omega_0$，采用本文所提控制策略时，VSG 的有功控制环表达式为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}-D(\omega-\omega_0)-\frac{\lambda_1 s}{\lambda_2+s}\omega-\frac{\lambda_3 s}{\lambda_4+s}P_{\mathrm{e}} \tag{16}$$

以网络中每 1 台 VSG 作为 1 个节点，则 VSGi 的输出有功功率[12]可以表示为

$$P_{\mathrm{e}i}\approx\sum_{j=1,j\neq i}^{N}E_iE_jB_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j) \tag{17}$$

式中：B_{ij} 为 VSGi 和 VSGj 的之间的等效互导纳；N 为 VSG 的台数。

文献[14]给出了单台 VSG 运行的能量函数构造方法，本文在此基础上构建多台 VSG 并联系统的能量函数，能量函数可表征为动能 E_{k} 和势能 E_{p} 之和，其中动能 E_{k} 可以表示为

$$E_{\mathrm{k}}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}J_i(\omega_i-\omega_0)^2 \tag{18}$$

定义 $P_{ei0}=\sum_{i=1}^{N}E_iE_jB_{ij}\cos\delta_{ij}$，则势能 E_p 可以表示为

$$E_p=-\sum_{i=1}^{N}(P_{mi}-P_{ei0})(\delta_i-\hat{\delta}_i)-\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}E_iE_jB_{ij}(\cos\delta_{ij}-\cos\hat{\delta}_{ij}) \tag{19}$$

式中，上方带“∧”的变量为该变量所对应的稳态值。

因此本文所构造的李雅普诺夫能量函数 $V(\delta,\omega)$ 的表达式为

$$V(\delta,\omega)=E_k+E_p \tag{20}$$

联立式(18)~式(20)可知，对于每台 VSG，在 $\delta_{ij}<\pi/2$ 的情况下，能量函数 $V(\delta,\omega)$ 正定[14]。结合式(18)~式(20)，可得能量函数的导函数，其表达式为

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}V(\delta,\omega)}{\mathrm{d}t}=&-\sum_{i=1}^{N}D_i(\omega_i-\omega_0)^2-\lambda_1\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\Omega}\cos(\delta_i-\delta_j)\cdot(\omega_i-\omega_0)^2-\lambda_2\sum_{i=1}^{N}(\omega_i-\omega_0)^2-\\&\lambda_4\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\Omega}\cos(\delta_i-\delta_j)(\omega_i-\omega_j)^2-\\&\lambda_3\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\Omega}E_iE_jB_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)(\omega_i-\omega_j)^2<0\end{aligned} \tag{21}$$

式中：Ω 为与第 i 台 VSG 直接相连的其他 VSG 的编号集合。

因为 $\lambda_1\sim\lambda_4$ 均大于 0，由式(21)可知，能量函数 $V(\delta,\omega)$ 的导函数小于 0，即能量函数负定。因此，根据李雅普诺夫定理可知，采用本文所提控制策略时，系统是稳定的。

3 仿真验证

为了验证所提控制方法的有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建了 4 台 VSG 并联系统模型，并和传统 VSG 控制方法、基于角频率高频分量补偿控制方法、基于电磁功率高频分量补偿控制方法进行对比，系统参数见表 1。

仿真中，系统的初始负荷为 40 kW，2.50 s 时系统负荷突增 20 kW，4.50 s 时系统负荷突减 20 kW。图 7 为采用传统 VSG 控制方法时，4 台 VSG 的输出有功功率波形。由图 7 可知，系统有功功率持续振荡，2.50 s 负荷突增时，最大功率峰值高达 18.7 kW，最大功率超调量为 24.7%，功率振荡时间大于 2.00 s。

图 8 为采用基于角频率高频分量补偿控制方法时，4 台 VSG 的输出有功功率波形。由图可知，相比图 7，4 台 VSG 并联系统的功率振荡得到明显抑制，最大功率峰值降为 16.5 kW，超调量降低到 10%，系统功率振荡时间约为 0.95 s。

图 9 为采用基于电磁功率高频分量补偿控制方法时，4 台 VSG 的输出有功功率波形。此时 4 台 VSG 的最大功率峰值为 17.6 kW，相比图 7，功率峰值依然是减小了，且系统功率振荡时间缩短了约 0.83 s。

图 10 为采用本文所提控制策略时，4 台 VSG 的输出有功功率波形。此时系统最大有功功率峰值

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

VSG	额定有功功率 P_m/kW	滤波电感 L_f/mH	滤波电容 C_f/μF	惯性系数 J_ω/(kg·m^{-2})	阻尼系数 D_p/(N·ms·rad^{-1})	线路电感 L_l/mH	控制参数 λ_1 / λ_2 / λ_3 / λ_4
VSG1	15	3	50	2	30	3.0	1 550/10/350/160
VSG2	15	3	50	1	30	1.0	1 550/10/350/160
VSG3	15	3	50	5	30	2.0	1 550/10/350/160
VSG4	15	3	50	3	30	1.5	1 550/10/350/160

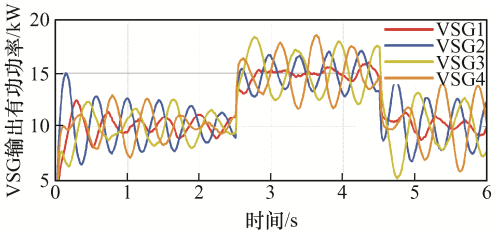


图 7　采用传统 VSG 控制时 4 台 VSG 的输出有功功率

Fig. 7 Output active power of four VSGs when using traditional VSG control method

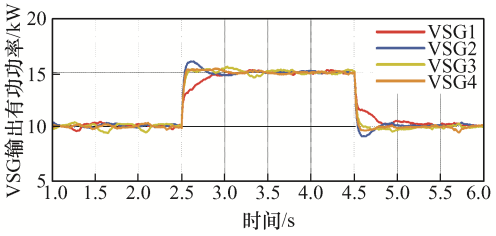


图 8　采用基于角频率高频分量补偿控制方法时 4 台 VSG 的输出有功功率

Fig. 8 Output active power of four VSGs when using angular frequency high-frequency component compensation control method

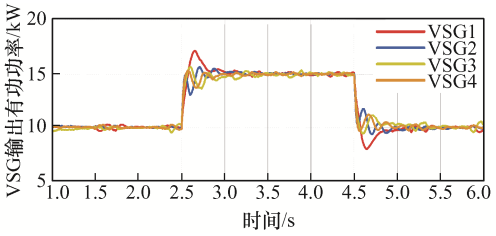


图 9　采用基于电磁功率高频分量补偿控制方法时 4 台 VSG 的输出有功功率

Fig. 9 Output active power of four VSGs when using electromagnetic power high-frequency component compensation control method

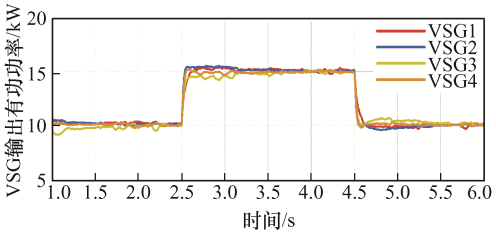


图 10　采用所提控制方法时 4 台 VSG 的输出有功功率

Fig. 10 Output active power of four VSGs when using proposed control method

仅为 15.5 kW，超调量仅为 3.33%，功率振荡时间缩短为 0.52 s。相比图 7~图 9，本文所提控制策略具有最佳的低频功率振荡抑制效果。

综上，相比其他方法，本文所提控制方法具有最佳的功率振荡抑制效果，且不会影响系统的稳态特性。

4　结论

本文针对 VSG 并联系统低频功率振荡问题进行研究，从状态反馈和极点配置角度出发，提出了一种基于暂态阻尼提升的低频功率振荡分散式协调抑制策略，可得如下结论。

(1)揭示了 VSG 并联系统的低频功率振荡机理，指出共轭极点对的存在是导致低频功率振荡的根本原因。

(2)从状态反馈和极点配置角度出发，明确了本文所提控制方法的物理意义，即通过构建基于角频率高频分量补偿和基于电磁功率高频分量补偿组合，以分散式形式抑制系统的低频功率振荡，且不影响系统的稳态特性。

(3)构建了李雅普诺夫能量函数，利用李雅普诺夫定理证明了采用本文所提控制方法时系统具有较好的稳定性。

参考文献：

[1] 崔健，房建军. 虚拟直流电机技术参数分析及虚拟惯量自适应控制[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 192-202.
Cui Jian, Fang Jianjun. Parameters analysis and virtual inertia adaptive control of virtual DC motor technique [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 192-202. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 赵恩盛, 韩杨, 周思宇, 等. 微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1413-1427.
Zhao Ensheng, Han Yang, Zhou Siyu, et al. Review and prospect of inertia and damping simulation technologies of microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1427. (in Chinese)

[4] Wang Zili, Chen Yandong, Li Xueping, et al. Active power oscillation suppression based on decentralized transient damping control for parallel virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2582-2592.

[5] Taffese A A, Endegnanew A G, D'Arco S, et al. Power oscillation damping with virtual capacitance support from modular multilevel converters [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(5): 897-905.

[6] Liu Jia, Miura Y, Bevrani H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.

[7] Shuai Zhikang, Huang Wen, Shen Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4127-4142.

[8] 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)

[9] 陈建, 任永峰, 孟庆天, 等. 含UDE附加阻尼支路的构网型直驱永磁同步风电机组次同步振荡抑制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 1985-2000.
Chen Jian, Ren Yongfeng, Meng Qingtian, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for grid-forming direct-drive permanent magnet synchronous generator with uncertainty and disturbance estimator supplementary damping branch [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 1985-2000. (in Chinese)

[10] 刘洋, 林英明, 余达, 等. 构网型虚拟同步化光储并网系统的频率支撑策略[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 152-161.
Liu Yang, Lin Yingming, Yu Da, et al. Frequency support strategy for grid-forming virtual synchronization PV-storage grid-connected system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 152-161. (in Chinese)

[11] Zhao Min, Yin Hang, Xue Ying, et al. Coordinated damping control design for power system with multiple virtual synchronous generators based on prony method [J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2021, 8: 316-328.

[12] Sun Peng, Yao Jun, Zhao Yang, et al. Stability assessment and damping optimization control of multiple grid-connected virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3555-3567.

[13] Choopani M, Hosseinain S H, Vahidi B. A novel comprehensive method to enhance stability of multi-VSG grids [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 502-514.

[14] Choopani M, Hosseinian S H, Vahidi B. New transient stability and LVRT improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 527-538.

[15] 洪灏灏, 顾伟, 黄强, 等. 微电网中多虚拟同步机并联运行有功振荡阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6247-6254.
Hong Haohao, Gu Wei, Huang Qiang, et al. Power oscillation damping control for microgrid with multiple VSG units [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6247-6254. (in Chinese)

[16] 林继灿, 刘沈全, 王钢, 等. 基于一致性算法的多虚拟同步机功率振荡协调抑制[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4668-4678.
Lin Jican, Liu Shenquan, Wang Gang, et al. Coordinated power oscillation suppression of multi-VSG based on consensus algorithm [J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4668-4678. (in Chinese)

[17] Shi Mengxuan, Chen Xia, Zhou Jianyu, et al. Frequency restoration and oscillation damping of distributed VSGs in microgrid with low bandwidth communication [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1011-1021.

[18] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.



苏灿

作者简介：

苏灿(1994—)，女，通信作者，硕士研究生，工程师。研究方向：电能质量分析与治理，新能源技术。E-mail：sucan51372@163.com。

王磊(1985—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源并网技术与电能质量。E-mail：15232102338@126.com。

周文(1978—)，男，硕士。研究方向：电能质量分析与治理，分布式电源与微电网技术。E-mail：hbdyyzhw@163.com。

程子玮(1995—)，男，硕士，工程师。研究方向：电能质量监测，新能源接入电网。E-mail：1132527121@qq.com。

张润涛(1996—)，男，硕士，助理工程师。研究方向：电能质量监测，新能源接入电网。E-mail：rtzhang9603@163.com。

岑宝仪(1993—)，女，硕士，助理工程师。研究方向：电能质量。E-mail：cenbaoyi@cet-electric.com。

(责任编辑：孙美菊)