引用格式:刘俊翔,夏向阳,巩宇,等.基于暂态惯量阻尼优化的VSG多机振荡抑制研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):67-76.
Citation: LIU Junxiang, XIA Xiangyang, GONG Yu, et al. Research on oscillation suppression of multi-VSG based on transient inertia and damping optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):67-76.

基于暂态惯量阻尼优化的VSG多机振荡抑制研究

刘俊翔[1],夏向阳[1],巩　宇[2],徐万方[3],马劭宇[1],夏　天[1]
(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114;2.国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100054;
3.北京四方继保工程技术有限公司,北京 100085)

摘　要:大规模新能源场站中多台虚拟同步发电机(virtual synchronous generator,VSG)的并联运行可能会引起系统功频振荡问题。为更好地协调多单元运行,提升振荡抑制效果,提出一种优化暂态惯量阻尼的振荡抑制策略。首先,基于小信号模型,揭示系统振荡机理与固定参数对稳定性的影响;其次,引入系统惯性中心,并将其作为全局协调基准,根据各VSG频率偏离惯性中心的程度及其变化率来优化惯量与阻尼特性,加速系统暂态能量衰减,有效减小负载扰动下各VSG频率差异,在不影响稳态运行的前提下,大幅缩短暂态过程中系统调节时间,降低冲击功率;再次,基于李雅普诺夫定理证明所提策略下系统的稳定性;最后,在Simulink仿真软件和RT-LAB半实物平台上验证所提策略的有效性。该研究可为大规模新能源场站中的多台虚拟同步发电机的并联运行提供理论支持与参考。

关　键　词:虚拟同步发电机;李雅普诺夫定理;功频振荡;多机并联系统;RT-LAB
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.007　　**中图分类号**:TM761　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0067-10

Research on oscillation suppression of multi-VSG based on transient inertia and damping optimization

LIU Junxiang[1], XIA Xiangyang[1], GONG Yu[2], XU Wangfang[3], MA Shaoyu[1], XIA Tian[1]
(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China;
3. Beijing Sifang Jibao Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The parallel operation of multiple virtual synchronous generators (VSGs) in large-scale renewable energy power stations may lead to the system's power frequency oscillation issues. To better coordinate multi-unit operation and enhance oscillation suppression, an oscillation suppression strategy optimizing transient inertia and damping is proposed. Firstly, based on a small-signal model, the oscillation mechanism and the impact of fixed parameters on stability are elucidated. Secondly, the system inertia centwe is introduced as a global coordination reference. Inertia and damping characteristics are optimized based on each VSG's frequency deviation from the inertia center and its rate of change. This accelerates transient energy decay, effectively minimizes frequency differences among VSGs under load disturbances, and significantly reduces system regulation time during the transient process while lowering impact power without compromising steady-state operation. Thirdly, the stability of the proposed strategy is demonstrated using Lyapunov's theorem. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is validated through simulations in SIMULINK and on the RT-LAB hardware-in-the-loop platform. This research provides theoretical support and reference for the parallel operation of multiple VSGs within large-scale renewable energy power stations.

Key words: virtual synchronous generator; Lyapunov theorem; power frequency oscillation; multi-machine parallel system; RT-LAB

收稿日期:2024-12-31;**修回日期**:2025-02-10
基金项目:国家自然科学基金(51977014)
通信作者:夏向阳(1968—),男,博士,教授,主要从事储能系统安全运行与优化控制等方面的研究;E-mail:307351045@qq.com

在“双碳”目标的推动下，以风电、太阳能为代表的分布式可再生能源在电力系统中的渗透率逐步提升[1-2]。作为可再生能源与电力系统进行能量交互的关键装置，电力电子设备在电力系统中已得到了广泛应用[3]。但电力电子设备低惯量与弱阻尼的特性给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战[4-5]。为应对这些问题，国内外学者提出了以虚拟同步发电机（virtual synchronous generator，VSG）为代表的构网型变流器控制技术，旨在通过模拟同步发电机（synchronous generator，SG）的运行特性，为系统提供阻尼和惯性支撑能力[6-8]。在新型电力系统中，随着分布式可再生能源容量和规模的逐步提升，多VSG系统支撑电力系统运行的场景日益增多，但VSG技术同时也带来了SG的振荡特性，该特性易导致系统出现功频振荡问题，且该问题在VSG多机并联系统中更突出，甚至可能导致非计划性切机及设备故障等问题[9]。因此，合理抑制VSG多机并联运行过程中的功频振荡是实现其大规模应用的关键。

文献[10]阐述了SG中的阻尼效应，并提出利用动态虚拟阻抗来减小阻尼系数，最终实现抑制振荡的方法。文献[11]兼顾系统暂态特性和稳态特性，在有功控制环中引入频率和有功功率高频分量以实现振荡抑制，取得了不错的效果。文献[12]应用径向基函数（radial basis function，RBF）神经网络算法，该算法在运行过程中可自适应协调惯量和阻尼系数来提升动态响应能力，可有效抑制有功功率振荡，改善转子角频率超调。文献[13]针对控制过程中参数调节灵活性不足的缺点，提出了另一种基于RBF的惯量和阻尼自适应补偿策略，有效实现了对VSG功频振荡的抑制。文献[14]借鉴电力系统稳定器的原理，设计了附加阻尼力矩补偿器，为系统提供正阻尼力矩，有效抑制了有功功率振荡。

这些文献均对单台VSG的运行特性及振荡抑制策略进行了深入研究，但均未涉及VSG多机并联系统中更复杂和剧烈的振荡问题[15]。文献[16-17]构建了VSG双机并联系统的小信号模型，从理论上进行分析，得到了各VSG的功频振荡是控制参数的差异性所导致的结论。文献[18]基于奈奎斯特判据分析了VSG多机并联系统中的交互参数对系统的影响，提出了一种基于一致性算法的振荡抑制策略，实现了各机功率振荡抑制。文献[19]通过协调各VSG之间惯量、阻尼和虚拟阻抗的比例，实现了VSG并联系统的振荡抑制，但该方法的参数整定过程较复杂。文献[20]提出了一种基于分布式架构的自适应惯量控制策略，提高了系统暂态特性，较好地抑制了振荡，但该策略未考虑其对系统稳态特性的影响。文献[21]在暂态过程中通过动态调节阻尼系数来实现双机并联系统的振荡抑制，但其未验证该方法在多机并联下的振荡抑制效果。

基于这些研究基础，本文先分析VSG多机并联系统的拓扑结构和运行特性，对系统功频振荡机理进行了详细阐述；再提出一种暂态惯量阻尼优化的振荡抑制策略，该策略通过引入系统惯性中心作为全局协调基准，协调负载扰动下具有不同频率响应的VSG的惯量和阻尼增益以加速减小其差异，大幅降低系统内冲击功率，缩短调节时间，有效抑制暂态过程中的振荡现象且不影响系统稳态运行；然后，基于李雅普诺夫定理分析所提控制策略的稳定性；最后，基于仿真试验和半实物平台将所提策略与其他方法的控制效果进行比较分析，验证所提策略的有效性。

1 VSG模型及多机并联运行特性

1.1 VSG控制原理

VSG技术基于下垂控制，通过模拟同步发电机的有功调频和无功调压特性参与电网的电压和频率调节[22]，VSG拓扑及控制结构如图1所示。在图1中，L_f和C_f分别为VSG的滤波电感和滤波电容；U_{dc}为直流侧等效电压；u和i分别为瞬间输出电压和电流；Z_l为VSG到公共连接点（point of common coupling，PCC）间的线路阻抗；P_{ref}和Q_{ref}分别为VSG的额定有功和无功功率；P和Q分别为实际运行时输出的有功和无功功率；P_m为VSG的机械功率；U_n和ω_n分别为额定电压和额定角频率；U和ω分别为实际运行时的电压和角频率；K_p和K_q分别为有功和无功下垂系数；J和D分别为VSG的虚拟惯量和阻尼系数；s为拉普拉斯算子；θ为电压相角。

VSG控制结构包括功率计算、有功-频率控制、无功-电压控制和电压电流双闭环等。其中，有功-频率和无功-电压下垂方程为

$$\begin{cases} P_m = P_{ref} + K_p(\omega_n - \omega) \\ U = U_n + K_q(Q_{ref} - Q) \end{cases} \tag{1}$$

VSG有功功率和频率关系的摇摆方程为

$$P_m - P - D\omega_n(\omega - \omega_n) = J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \tag{2}$$

VSG控制在引入惯量和阻尼特性的同时，也引

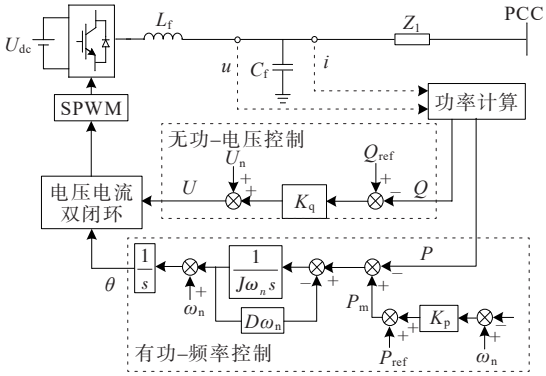


图 1　VSG 拓扑及控制结构

Figure 1　Topology and control structure of VSG

入了系统振荡问题。当多台采用VSG控制的变流器并联运行时，如果负载有功功率突变，系统将发生振荡现象[23]。建立如图2所示的VSG多机并联系统。该系统由多个VSG并联而成。在图2中，$U_{dc,j}$、$L_{f,j}$、$C_{f,j}$、$Z_{l,j}$、u_j、i_j分别为第$j(j=1,2,\cdots,n)$个VSG结构VSG_j的直流等效电压、滤波电感、滤波电容、该VSG_j到PCC间的线路阻抗、输出电压与电流；u_p为PCC电压。

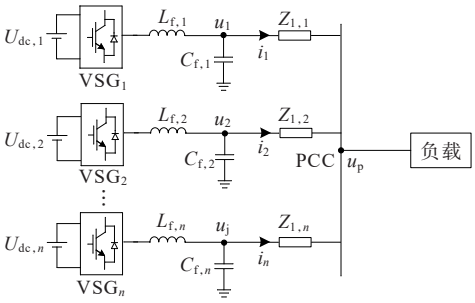


图 2　VSG 多机并联系统拓扑

Figure 2　Topology of Multi-VSG parallel system

由线路功率传输理论可知，图2中VSG_j的有功功率P_i为

$$\begin{cases} P_i = 3\dfrac{U_i U_p}{x_i}\delta_{p,i} = K_i\delta_{p,i} = K_i\dfrac{\omega_i - \omega_p}{s} \\ K_i = \dfrac{3U_i U_p}{x_i} \end{cases} \tag{3}$$

式中，U_i为第i台VSG的实际电压幅值；U_p为PCC电压幅值；x_i为第i台VSG的等效线路电抗；ω_i为第i台VSG的实际角频率；ω_p为PCC角频率；$\delta_{p,i}$为第i台VSG的输出电压和PCC电压间的相角差；K_i为第i台VSG的功率同步系数。

1.2　VSG 多机并联运行振荡机理及稳定性分析

当负载有功功率发生扰动时，依据功率守恒定律，则有

$$\Delta P_{load} = \sum_{i=1}^{n}\Delta P_i \tag{4}$$

式中，ΔP_{load}为负载有功功率变化量；ΔP_i为第i台VSG的有功功率变化量；n为系统内VSG的总数。

结合式(1)～(3)，可得到各VSG在输出功率指令和PCC频率扰动时的小信号模型，即

$$\frac{\Delta\omega_i}{\Delta P_i} = -\frac{1}{J_i\omega_n s + D_i\omega_n + K_{p,i}} = G_{p,i}(s) \tag{5}$$

$$\frac{\Delta\omega_i}{\Delta\omega_p} = \frac{K_i}{J_i\omega_n s^2 + \left(D_i\omega_n + K_{p,i}\right)s + K_i} = G_{\omega,i}(s) \tag{6}$$

式中，$\Delta\omega_i$、J_i、D_i和$K_{p,i}$分别为第i台VSG的角频率变化量、虚拟惯量、阻尼系数和有功下垂系数；$G_{p,i}(s)$、$G_{\omega,i}(s)$分别为第i台VSG的有功-频率传递函数、PCC角频率-VSG角频率传递函数；$\Delta\omega_p$为PCC角频率变化量。

联立式(4)～(6)，得到负载有功功率扰动下系统各VSG的功率和频率输出响应，即

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta P_i}{\Delta P_{load}} = \dfrac{G_{\omega,i}(s)/G_{p,i}(s)}{\sum\limits_{i=1}^{n}G_{\omega,i}(s)/G_{p,i}(s)} \\ \dfrac{\Delta\omega_i}{\Delta P_{load}} = \dfrac{G_{\omega,i}(s)}{\sum\limits_{i=1}^{n}G_{\omega,i}(s)/G_{p,i}(s)} \end{cases} \tag{7}$$

在该VSG多机并联系统中，当负载有功功率发生扰动时，各VSG之间不同的参数会造成各VSG不同的响应速度，进而导致各VSG在频率与有功功率上的差异，这种差异可能引发严重的暂态振荡问题。由式(7)可知，VSG多机并联系统不发生振荡的必要条件为

$$J_1 : J_2 : \cdots : J_n = K_1 : K_2 : \cdots : K_n = \left(D_1\omega_n + K_{p,1}\right) : \left(D_2\omega_n + K_{p,2}\right) : \cdots : \left(D_n\omega_n + K_{p,n}\right) \tag{8}$$

仅当各VSG的参数满足式(8)时，各VSG输出有功功率传递函数将成比例。此时，若负载有功功率发生变化，则各VSG输出的有功功率将按有功传递函数的比例进行分配，不会发生振荡现象。但该条件对于实际运行的VSG多机并联系统过于苛刻，不易实现。

为更好地展现VSG多机并联系统的动态过程，根据表1的仿真参数构建4台VSG并联系统。在该系统中，负载有功功率突增时的各VSG频率曲线如图3所示。各VSG控制参数受式(5)的约束，均可能导致系统的有功功率发生更严重的振荡问题。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

VSG 标号	虚拟惯量 J/(kg·m^{-2})	阻尼系数 D/(N·ms·rad^{-1})	额定功率 P_{ref}/kW	线路电感 L/mH	有功下垂系数 K_p/(kW·rad^{-1})	惯量增益系数 K_J	阻尼增益系数 K_D
1	6	15	80	1	10	3.0	15
2	4	10	60	1	8	2.0	10
3	3	20	70	1	15	1.5	20
4	2	15	50	1	10	1.0	15

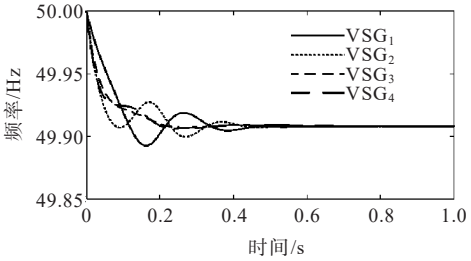


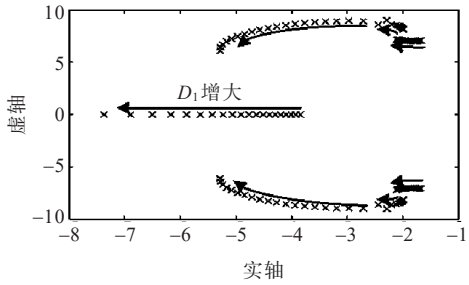
图 3 负载有功功率突增时的各 VSG 的频率曲线

Figure 3 Frequency curves of each VSG under a sudden increase in active power load

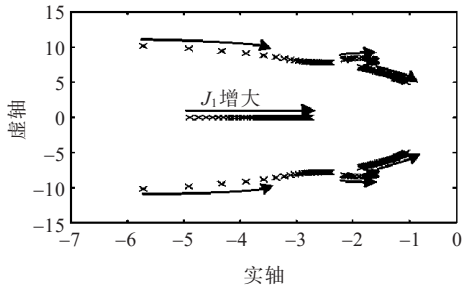
VSG$_1$的输出有功功率传递函数为

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_{\text{load}}}=\frac{\dfrac{-K_1\left(J_1\omega_n s+D_1\omega_n+K_{p,1}\right)}{J_1\omega_n s^2+\left(D_1\omega_n+K_{p,1}\right)s+K_1}}{\dfrac{-K_1\left(J_1\omega_n s+D_1\omega_n+K_{p,1}\right)}{J_1\omega_n s^2+\left(D_1\omega_n+K_{p,1}\right)s+K_1}+\cdots+\dfrac{-K_4\left(J_4\omega_n s+D_4\omega_n+K_{p,4}\right)}{J_4\omega_n s^2+\left(D_4\omega_n+K_{p,4}\right)s+K_4}} \tag{9}$$

类似地，可推导其他 VSG 的输出有功功率传递函数。在式(9)中，VSG$_1$输出有功功率振荡主要受其自身参数影响，利用根轨迹法分析虚拟惯量 J_1 和阻尼系数 D_1 变化对极点的影响，结果如图 4 所示。



(a) D_1变化时极点轨迹



(b) J_1变化时极点轨迹

图 4 J_1和 D_1 变化时的 VSG$_1$的极点轨迹

Figure 4 Pole trajectories of VSG$_1$ when J_1 and D_1 change

从图 4(a)中可以看出，当 D_1 增大时，系统根轨迹逐渐远离虚轴。其中，主导极点严格遵从该趋势，且其衰减系数逐渐增大，输出有功功率振荡有一定程度改善。从图 4(b)中可以看出，当 J_1 增大时，系统根轨迹逐渐靠近虚轴，主导极点的衰减系数和自然振荡频率均减小，有功功率的超调量提高，调节时间延长，系统稳定性降低。

综上所述，在 VSG 多机并联系统中，由于各 VSG 间的固有差异，系统表现出明显的振荡现象。通过调整各 VSG 的固定参数，如减小虚拟惯量或增大阻尼系数等，可在一定程度上提高系统稳定性。但由于 VSG 应满足其对频率支撑的需求，虚拟惯量不能过小；但过大的阻尼系数将导致有功功率稳态偏差与预期不符。因此，仅通过调节系统的固定系数难以兼顾暂态和稳态特性的双重要求。

2 暂态惯量阻尼优化控制策略

系统惯性中心(center of inertia，COI)可作为反映整体频率波动的代表性参数，当系统处于稳态时，其值与各 VSG 的频率相同；在系统处于暂态时，各 VSG 的频率振荡具有差异，系统惯性中心体现了这些差异的综合表现，将呈现很小甚至几乎无振荡的响应。因此，引入系统惯性中心有利于抑制暂态过程的振荡现象。系统惯性中心指数 ω_{COI} 定义式为

$$\omega_{\text{COI}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\omega_i \tag{10}$$

为改善系统动态性能，本文从加速系统暂态能量衰减角度出发，提出一种暂态惯量阻尼优化的振荡抑制策略。该策略将惯性中心指数 ω_{COI} 作为系统全局协调基准，根据各 VSG 频率偏离惯性中心的程度及其变化率优化动态特性，在不影响系统稳态的情况下改善暂态过程中的振荡现象，振荡抑制策略控制原理如图 5 所示。在图 5 中，$P_{m,i}$ 为第 i 台 VSG 的机械功率；$K_{D,i}$、$K_{J,i}$ 分别为第 i 台 VSG 的阻尼增

益系数和惯量增益系数。

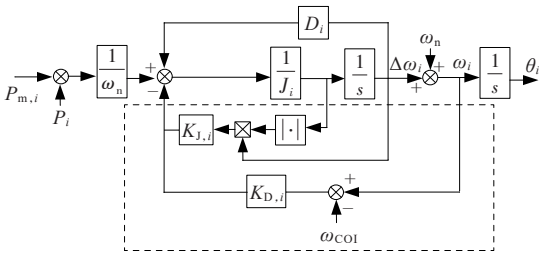


图 5　振荡抑制策略控制原理

Figure 5　Control principle of oscillation suppression strategy

所提振荡抑制策略的控制表达式为

$$P_{m,i}-P_i-D_i\omega_n\Delta\omega_i-K_{D,i}\omega_n(\omega_i-\omega_{COI})=J_i\omega_n\frac{d\omega_i}{dt}+K_{J,i}\omega_n\Delta\omega_i\left|\frac{d\omega_i}{dt}\right| \tag{11}$$

依据式(11)，暂态过程中频率变化速度快及偏离惯性中心程度大的VSG将获得较大的等效惯量和阻尼增益；频率变化速度慢及偏离惯性中心程度小的VSG将获得较小的等效惯量和阻尼增益。通过该增益机制，各VSG间的频率差异加速缩小，系统暂态过程中的振荡问题将得到改善。当系统接近稳态时，各VSG的频率基本一致且变化缓慢。此时，所提策略对阻尼和惯量特性的影响逐渐减弱直至消失，不影响系统稳态运行。

在多机并联系统中，第 i 台VSG的输出有功功率 P_i 为

$$P_i=\sum_{j\neq i}^{n}U_iU_jG_{i,j}\cos\delta_{i,j}+\sum_{j\neq i}^{n}U_iU_jB_{i,j}\sin\delta_{i,j}\approx\sum_{j\neq i}^{n}U_iU_jG_{i,j}+\sum_{j\neq i}^{n}U_iU_jB_{i,j}\sin\delta_{i,j}=P_{i,0}+\sum_{j\neq i}^{n}U_iU_jB_{i,j}\sin\delta_{i,j} \tag{12}$$

式中，U_i 为第 i 台VSG的电压；$P_{i,0}$ 为输出有功功率中不受相角差影响的分量；$G_{i,j}$、$B_{i,j}$ 分别为 i、j 节点间的电导与电纳；$\delta_{i,j}$ 为 i、j 节点间的相角差。

根据式(11)、(12)，本文所提控制策略下的有功-频率控制方程可改写为

$$J_i\omega_n\frac{d\omega_i}{dt}=(P_{m,i}-P_{i,0})-\sum_{j\neq i}^{n}U_iU_jB_{i,j}\sin\delta_{i,j}-D_i\omega_n\Delta\omega_i-K_{J,i}\omega_n\Delta\omega_i\left|\frac{d\omega_i}{dt}\right|-K_{D,i}\omega_n(\omega_i-\omega_{COI}) \tag{13}$$

李雅普诺夫定理第二方法指出，复杂系统可通过构建包含势能函数和动能函数的能量函数，分析其导数的定号性来判定系统稳定性[24]。该系统的能量函数 $V(\delta,\omega)$ 为

$$V(\delta,\omega)=E_k+E_p \tag{14}$$

式中，δ、ω 分别为VGS的相角与角频率；E_k 为系统动能函数；E_p 为系统势能函数。

E_k、E_p 分别为

$$E_k=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}J_i\omega_n\Delta\omega_i^{\ 2} \tag{15}$$

$$E_p=-\sum_{i=1}^{n}(P_{m,i}-P_{i,0})(\delta_i-\delta_{i,0})-\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n}U_iU_jB_{i,j}\cos(\delta_{i,j}-\delta_{i,j}^0) \tag{16}$$

式中，$\delta_{i,0}$ 为第 i 台VSG的相角初值；$\delta_{i,j}^0$ 为 i、j 节点间的相角差初值；$\delta_{i,0}$ 为第 i 台VSG的初始相角。

无论该系统在哪种状态下，若能量函数的导数恒为负数，则该系统为全局渐进稳定系统。对该系统的能量函数求导，可得

$$\frac{dV(\delta,\omega)}{dt}=\frac{dE_k}{dt}+\frac{dE_p}{dt}=-\sum_{i=1}^{n}D_i\omega_n\Delta\omega_i^{\ 2}-\sum_{i=1}^{n}K_{J,i}\omega_n\Delta\omega_i^{\ 2}\left|\frac{d\omega_i}{dt}\right|-\sum_{i=1}^{n}K_{D,i}\omega_n\Delta\omega_i(\omega_i-\omega_{COI}) \tag{17}$$

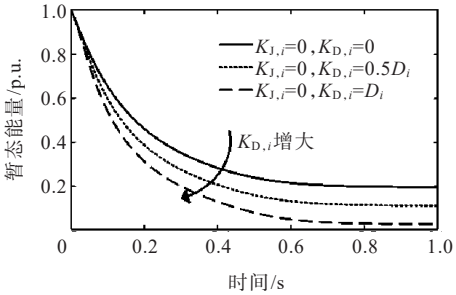
结合式(10)、(17)，可得

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{n}K_{D,i}\omega_n\Delta\omega_i(\omega_i-\omega_{COI})=\\&-\sum_{i=1}^{n}K_{D,i}\omega_n\Delta\omega_i\left(\omega_i-\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}\omega_j\right)=\\&-\sum_{i=1}^{n}K_{D,i}\omega_n\Delta\omega_i\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}(\omega_i-\omega_j)=\\&-\sum_{i=1}^{n}K_{D,i}\omega_n\Delta\omega_i\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}(\Delta\omega_i-\Delta\omega_j)=\\&-\frac{1}{2n}\omega_n\sum_{i=1}^{n}K_{D,i}\sum_{j=1}^{n}(\Delta\omega_i-\Delta\omega_j)^2\end{aligned} \tag{18}$$

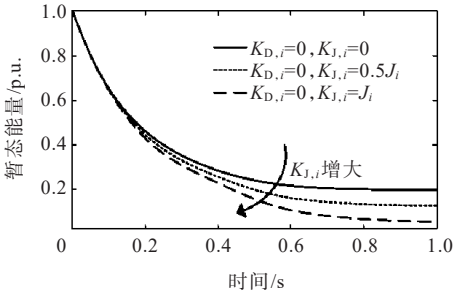
综合式(17)、(18)可知，当参数 D_i、$K_{D,i}$ 和 $K_{J,i}$ 均大于0时，$\frac{dV(\delta,\omega)}{dt}<0$ 恒成立。依据李雅普诺夫定理，本文所提控制策略下系统渐进稳定。其中，各VSG阻尼系数 D_i 始终大于0。

第 i 台VSG的阻尼增益系数 $K_{D,i}$ 和惯量增益系数 $K_{J,i}$ 对系统暂态能量衰减的影响反映在式(17)中。在相同条件下，阻尼增益系数 $K_{D,i}$ 越大，则式(17)的能量函数的导数模值越大，暂态能量衰减速度越快。在基于表1参数的4台VSG并联系统中，$K_{D,i}$ 和 $K_{J,i}$ 对暂态能量衰减的影响如图6所示。从图6中可以看出，当未引入优化控制策略时，即阻尼增益系数 $K_{D,i}$ 和惯量增益系数 $K_{J,i}$ 均为0时，暂态能量

衰减缓慢，系统调节时间较长。增大阻尼增益系数 $K_{D,i}$ 或惯量增益系数 $K_{J,i}$ 均会加速暂态能量的衰减，且增益系数 $K_{J,i}$ 的值越大，暂态能量衰减速度越快。这表明，在保持系统稳定的情况下，本文所提控制策略可加速暂态能量衰减。



(a) $K_{D,i}$对暂态能量衰减的影响



(b) $J_{J,i}$对暂态能量衰减的影响

图 6 $K_{D,i}$ 和 $K_{J,i}$ 对暂态能量衰减的影响

Figure 6 Effects of $K_{D,i}$ and $K_{J,i}$ on transient energy decay

参数设计过大将导致系统在稳态点附近波动。结合文献[25]对虚拟惯量的约束，系统等效最大虚拟惯量应满足

$$J_i + K_{J,i}|\Delta\omega|_{\max} \leqslant \frac{P_{\max}}{\omega_n\left|\frac{d\omega}{dt}\right|_{\max}} \tag{19}$$

式中，$|\Delta\omega|_{\max}$ 和 $\left|\frac{d\omega}{dt}\right|_{\max}$ 分别为系统对频率偏移量和频率变化率的最大值；$P_{\max}$ 为 VSG 的最大有功功率。

结合式(19)与对 $\frac{dV(\delta,\omega)}{dt}<0$ 恒成立的要求，$K_{J,i}$ 应满足：

$$0 < K_{J,i} \leqslant \frac{1}{|\Delta\omega|_{\max}}\left(\frac{P_{\max}}{\omega_n\left|\frac{d\omega}{dt}\right|_{\max}} - J_i\right) \tag{20}$$

为保证系统暂态能量快速衰减，并维持各 VSG 阻尼系数在暂态过程中的主导作用，结合式(17)，得到本文中阻尼增益系数 $K_{D,i}$ 的约束，即

$$0 < K_{D,i} \leqslant D_i \tag{21}$$

3 仿真和实验验证

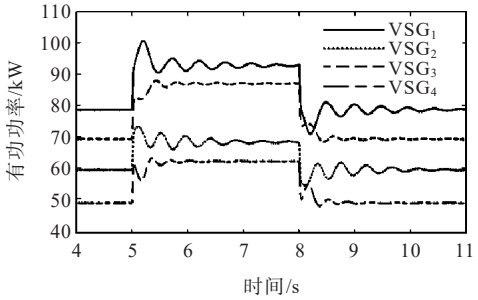
为验证所提暂态惯量阻尼优化控制策略在系统振荡抑制上的有效性，在 Simulink 平台上建立参数如表 1 所示的 4 台 VSG 并联系统模型，分别对传统控制方法、文献[17]所采用的暂态电磁功率补偿策略和本文所提策略的振荡抑制效果进行分析验证。

3.1 传统控制方法和暂态电磁功率补偿策略下 VSG 输出特性

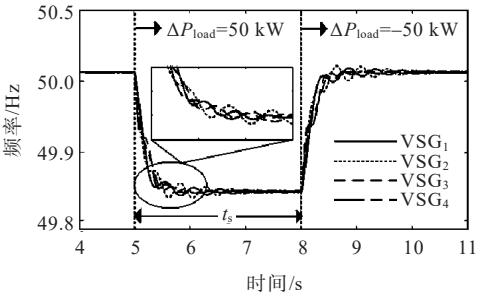
VSG 多机并联系统采用传统控制方法和暂态电磁功率补偿策略下各 VSG 的输出特性分别如图 7、8 所示。初始时刻，系统有功负荷为 250 kW，运行在稳定状态；5.0 s 时，负荷有功功率突增至 300 kW；8.0 s 时，系统恢复为初始状态，各 VSG 相互协调以维持系统功率平衡。

从图 7 中可以看出，在传统控制方法下，该系统内负载有功功率突变将导致各 VSG 发生严重振荡。在图 7(a)中，5.0 s 时的负载有功功率突增至 300.0 kW，VSG_1 和 VSG_2 抢发功率，且 VSG_1 振荡更严重；5.2 s 时，其有功功率峰值达到 101.4 kW，与该时间段内 92.0 kW 的平均值相比，其峰值高出 9.4 kW，偏移率为 10.2%；3.0 s 后，有功功率仍存在明显幅度的波动；8.0 s 时，负载有功功率恢复至 250.0 kW，VSG_1 和 VSG_2 先减小有功功率输出，VSG_1 的振荡更严重；8.2 s 时，该系统的有功功率仅 71.6 kW，比该时间段内的平均值 79.0 kW 低 7.4 kW，偏移率达 9.4%。从图 7(b)中可以看出，当负载有功功率突变时，各 VSG 频率存在较大差异，其振荡持续时间较长，系统调节时间 t_s 大于 3.00 s。据此可得出传统控制方法下多机并联系统运行风险较大的结论。

暂态电磁功率补偿策略下系统内各 VSG 的冲击功率和系统调节时间相较于传统控制方法均有所减小。从图 8(a)中可以看出，5.0 s 时，该系统负载有功功率突增，各 VSG 间输出有功功率仍存在振荡，但冲击功率均减小，VSG_1 的有功功率峰值由 101.4 kW 降低至 95.3 kW，其有功功率偏移率为 6.0%；8.0 s 时，该系统的负载有功功率恢复至 250 kW，VSG_1 的最大有功功率偏移率降低至 4.4%。从图 8(b)中可以看出，该系统调节时间从传统方法的超过 3.00 s 缩短至所提策略的 2.30 s，所提策略有效地提高了该系统的动态稳定性。



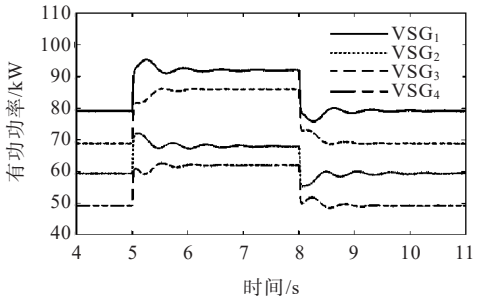
(a)输出有功功率波形



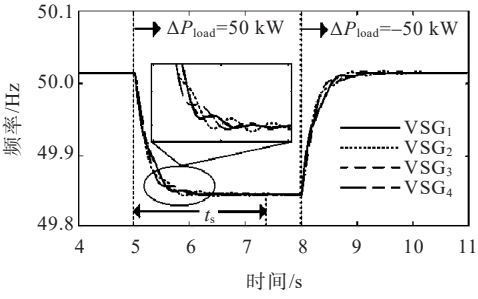
(b)输出频率波形

图 7　传统控制方法下 VSG 输出特性

Figure 7　Output characteristics of VSG under traditional control method



(a)输出有功功率波形



(b)输出频率波形

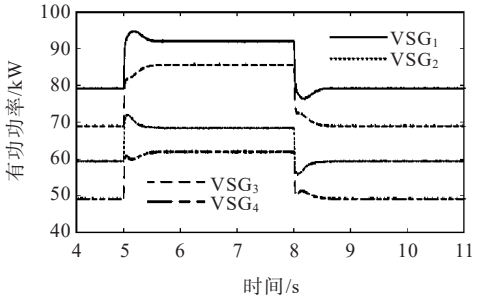
图 8　暂态电磁功率补偿策略下 VSG 输出特性

Figure 8　Output characteristics of VSG under under transient electromagnetic power compensation strategy

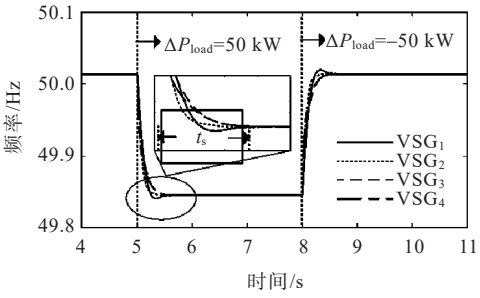
3.2　所提控制策略下 VSG 输出特性

所提控制策略下 VSG 输出特性如图 9 所示，系统内有功负荷变化与文 3.1 中的相同。

从图 9 中可以看出，本文所提控制策略下的



(a)输出有功功率波形



(b)输出频率波形

图 9　所提控制策略下 VSG 输出特性

Figure 9　Output characteristics of VSG under under proposed control strategy

VSG 暂态特性得到大幅改善。在图 9(a)中，5.0 s 时，负载有功功率突增，该系统内各 VSG 的有功功率偏移率均大幅减小。其中，VSG_1 的有功功率峰值仅为 94.6 kW，该值比传统控制方法的降低 7.4%，其优于暂态电磁功率补偿策略中的表现，系统有功功率能迅速进入稳态；8.0 s 时，负载有功功率恢复至 250.0 kW，VSG_1 的最大有功功率偏移率仅为 3.7%，该值比传统方法的减小 5.7 个百分点。在图 9(b)中，各 VSG 频率基本无振荡，调节时间大幅缩短至 0.58 s，远小于传统控制方法和暂态电磁功率补偿策略中的调节时间。

为详细对比本文所提策略与其他策略的优劣，不同策略下系统内各 VSG 在 5.0～8.0 s 负载有功功率突增和 8.0～11.0 s 负载有功功率骤降这两种情况下的最大有功功率偏移率见表 2。

由表 2 可知，在传统控制方法中，在负载有功功率突变期间，各 VSG 的最大功率偏移率普遍较高。特地，5.0～8.0 s，VSG_1 的最大功率偏移率为 10.2%；8.0～11.0 s，VSG_4 的最大功率偏移率为 14.1%，系统表现出较大的功率波动。相比之下，暂态电磁功率补偿策略下功率波动较小，但个别 VSG 的最大功率偏移率仍然较高，8.0～11.0 s，VSG_2 的最大功率偏移率为 6.9%。与这两种策略相比，本文所提控制策略表现出更优异的振荡抑制能力，在 5.0～8.0 s 和

表 2 各 VSG 有功功率偏移率对比

Table 2 Comparison of active power deviation rates for each vsg

VSG 编号	各策略下最大有功功率偏移率/%					
	传统控制方法		暂态电磁功率补偿策略		本文所提策略	
	5.0～8.0 s	8.0～11.0 s	5.0～8.0 s	8.0～11.0 s	5.0～8.0 s	8.0～11.0 s
1	10.2	9.4	3.6	4.4	2.8	3.7
2	8.3	7.9	5.8	6.9	3.9	4.3
3	6.8	7.7	4.9	5.7	0.0	0.0
4	9.7	14.1	4.5	5.1	3.2	3.4

8.0～11.0 s这两个时间段内，该系统的平均最大功率偏移率分别为2.5%和2.9%，均低于传统方法和暂态电磁功率补偿策略的平均最大功率偏移率。尤其是VSG_3，其有功功率基本未发生振荡。同时，各VSG有功功率偏移率标准差从传统方法的2.15%降至0.98%，所提策略优化了暂态过程中的功率均衡分配。特别地，在系统调节时间上，这3种策略的效果对比也很明显，传统控制方法下系统调节时间超过3.00 s，暂态电磁功率补偿策略下的系统调节时间缩短至2.30 s，而本文所提策略下系统调节时间锐减至0.58 s。综上所述，本文所提策略能有效减小功率波动并使系统迅速恢复稳态，具有良好的振荡抑制效果。

3.3 基于RT-LAB的实验验证

为对所提暂态惯量阻尼优化控制策略进行进一步验证，在RT-LAB半实物平台中对所构建的VSG多机并联系统模型进行实验验证。RT-LAB半实物平台如图10所示，该平台主要包括实时仿真机、上位机和示波器等。其中，主电路由OP 5600实时仿真机模拟，控制系统由DSP 25833构成。

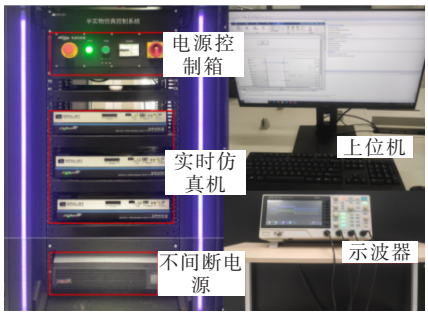


图 10 RT-LAB半实物平台

Figure 10 RT-LAB hardware-in-the-loop platform

设置系统运行工况基本与仿真模型保持一致，5.0 s时，负荷有功功率突增50 kW，并在2.5 s后切出。观察这3种策略下各VSG有功功率响应，各策略下有功功率实验波形如图11所示。

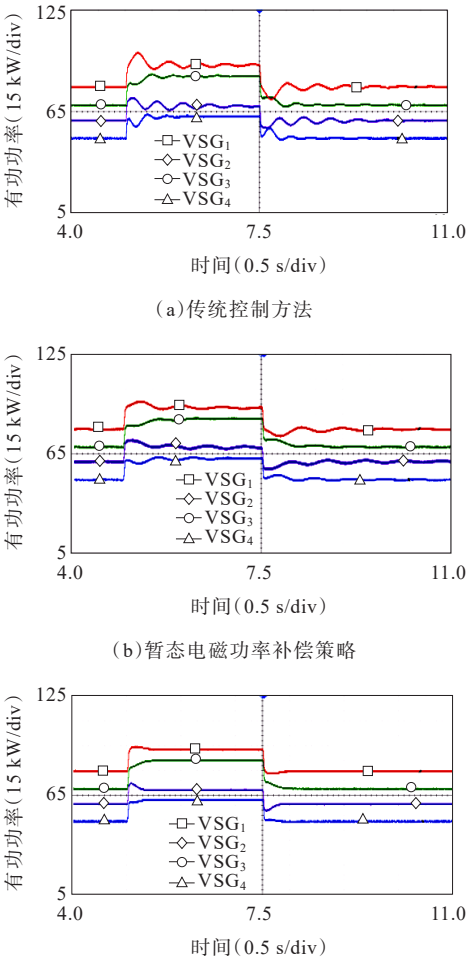


图 11 各策略下有功功率实验波形

Figure 11 Experimental waveforms of active power under each strategy

从图11中可以看出，传统控制方法下VSG多机并联系统内各VSG存在明显振荡。其中，VSG_1和VSG_2在工况切换时仍未达到稳态，不利于系统的安全稳定运行；暂态电磁功率补偿策略下各VSG的振荡幅度有所减小，但系统仍需较长时间才能达到稳态；而本文所提控制策略下振荡幅度和调节时间都有明显的优化，各VSG在0.5 s内都进入稳定运行状态，这不仅充分表明硬件在环实验结果与仿真结果相符，更验证了所提策略更优越的动态响应性能。

4 结语

针对VSG多机并联系统的振荡问题，本文提出一种基于暂态惯量阻尼优化的振荡抑制策略。通过理论、仿真和实验分析，得到如下结论：

1）建立VSG多机并联系统的小信号模型，揭示了由参数差异性导致的振荡机理，并引入系统惯性中心作为全局动态协调基准，提出差异化动态调节机制。通过测量各VSG频率偏离惯性中心的程度及其变化率，动态调整惯量与阻尼增益，在加速暂态能量衰减的同时，不影响系统稳态运行。

2）基于李雅普诺夫定理严格证明了所提策略下系统的全局渐近稳定性，并通过稳定性约束和系统运行约束条件确保动态增益的合理边界，解决了传统方法在暂态和稳态特性间的不协调问题。

3）基于Simulink的仿真和RT-LAB的实验结果均表明，本文所提控制策略可将系统调节时间从传统控制方法的大于3.00 s缩短至0.58 s，最大有功功率偏移率从平均超9%降低至3%以内，有效改善了系统运行状态。在多机并联场景下，各VSG频率差异快速收敛，验证了策略对复杂交互振荡的有效抑制能力。

参考文献：

[1] 栗峰，丁杰，周才期，等．新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J]. 电网技术，2024，48(1): 184-199.
LI Feng, DING Jie, ZHOU Caiqi, et al. Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 184-199.

[2] 张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.

[3] 王祺，张泽轲，郭杰帅，等．新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报，2024，44(2): 504-517.
WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-517.

[4] 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): 1413-1428.
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): 1413-1428.

[5] 曹炜，钦焕乘，陆建忠，等．新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.

[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] 朱作滨，孙树敏，丁月明，等．基于储能协调自适应VSG控制策略研究[J]. 太阳能学报，2023，44(12): 410-419.
ZHU Zuobin, SUN Shumin, DING Yueming, et al. Research on adaptive vsg control strategy based on energy storage coordination[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(12): 410-419.

[8] 周年光，谢欣涛，马俊杰，等．风电场配套储能的自适应虚拟惯性：阻尼控制[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(3): 150-158.
ZHOU Nianguang, XIE Xintao, MA Junjie, et al. An adaptive virtual inertial damping control for wind farm integrated energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 150-158.

[9] 兰飞，高占兴，黎静华．基于超前滞后环节附加前馈阻尼的VSG控制策略[J]. 高电压技术，2024，50(1): 138-147.
LAN Fei, GAO Zhanxing, LI Jinghua. VSG control strategy based on additional feedforward damping of leading and lagging links[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 138-147.

[10] HUANG L B, XIN H H, YUAN H, et al. Damping effect of virtual synchronous machines provided by a dynamical virtual impedance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 570-573.

[11] 江世明，唐杰．基于暂态阻尼增强的改进VSG控制策略[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(19): 144-154.
JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 144-154.

[12] 杨旭红，金宏艳，刘众鑫，等．光储逆变器的虚拟同步机自适应控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(2): 181-189.
YANG Xuhong, JIN Hongyan, LIU Zhongxin, et al. Research on adaptive control strategy of virtual

synchronous machine applied for the photovoltaic and energy storage inverter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 181-189.

[13] 张子星, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于RBF的VSG虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 155-164.
ZHANG Zixing, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 155-164.

[14] 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.

[15] 曾德银, 姚骏, 张田, 等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2048-2061+2385.
ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2048-2061+2385.

[16] 石荣亮, 兰才华, 张群英, 等. 储能VSG并联组网系统的有功振荡特性分析及其改进策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 51-57.
SHI Rongliang, LAN Caihua, ZHANG Qunying, et al. Analysis and improvement strategy of active power oscillation characteristics for energy storage VSG parallel networking system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 51-57.

[17] 兰征, 刘祖潭, 何东, 等. 基于暂态电磁功率补偿的VSG并联系统有功振荡抑制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 23-33.
LAN Zheng, LIU Zutan, HE Dong, et al. Active oscillation suppression strategy of paralleled virtual synchronous generators based on transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 23-33.

[18] 许振宇, 陈殷, 石梦璇, 等. 基于一致性算法的并联虚拟同步机系统小信号模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2427-2438.
XU Zhenyu, CHEN Yin, SHI Mengxuan, et al. Small-signal analysis of consensus-algorithm-based parallel virtual synchronization generators system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2427-2438.

[19] RODRÍGUEZ-CABERO A, ROLDÁN-PÉREZ J, PRODANOVIC M. Virtual impedance design considerations for virtual synchronous machines in weak grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1477-1489.

[20] FU S Q, SUN Y, LIU Z J, et al. Power oscillation suppression in multi-VSG grid with adaptive virtual inertia[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107472.

[21] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 4127-4142.

[22] 张赟宁, 谢永辉, 张磊, 等. 自适应调节有功功率偏差的虚拟同步发电机暂态控制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(8): 104-114.
ZHANG Yunning, XIE Yonghui, ZHANG Lei, et al. Transient control strategy of virtual synchronous generator with adaptive regulation of active power deviation[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(8): 104-114.

[23] 秦本双,徐永海.多虚拟同步机并网系统功频振荡模态分析[J].中国电机工程学报,2021,41(19):6570-6581.
QIN Benshuang, XU Yonghai. Modal analysis of multi-virtual synchronous machine grid-connected power-frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6570-6581.

[24] 李雪萍, 王自力, 陈燕东, 等. 基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 25-37.
LI Xueping, WANG Zili, CHEN Yandong, et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 25-37.

[25] 郭磊磊, 贾凯阳, 朱虹, 等. 基于有功微分补偿与虚拟惯量自适应的光储VSG控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 21-31.
GUO Leilei, JIA Kaiyang, ZHU Hong, et al. Control strategy for a PV energy storage VSG based on active power differential compensation and virtual inertia adaptive strategy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 21-31.