

基于带通阻尼功率反馈的VSG自适应惯量控制策略

卢源¹, 谭翔天^{2,3}, 文孝强^{2,3*}, 王建国^{2,3}, 贺雪冰^{2,3}, 孙晓宁^{2,3}

(1. 广西壮族自治区南宁市西乡塘区广西国能能源发展有限公司, 广西省 南宁市 530009; 2. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林省 吉林市 132012; 3. 吉林省精密驱动智能控制国际联合研究中心, 吉林省 吉林市 132012)

VSG Adaptive Inertia Control Strategy Based on Band-Pass Damping Power Feedback

LU Yuan¹, TAN Xiangtian^{2,3}, WEN Xiaoliang^{2,3*}, WANG Jianguo^{2,3}, HE Xuebing^{2,3}, SUN Xiaoning^{2,3}

(1. Guangxi Guoneng Energy Development Co., Ltd., Xixiangtang District, Nanning City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi Province 530009, China; 2. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin City 132012, Jilin Province, China; 3. International Joint Research Center for Precision Drive and Intelligent Control, Jilin City 132012, Jilin Province, China)

摘要: 【目的】传统电网依赖同步发电机的惯性响应维持频率稳定, 但光伏发电的波动性、低惯量特性以及调频延迟问题, 导致系统在光照突变或负荷扰动时易出现频率波动加剧、动态响应不足等现象; 同时, 传统虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)固定参数难以适应多工况。为解决上述问题, 提升含光伏电力系统的频率稳定性与动态调节性能, 提出一种基于带通阻尼功率反馈的自适应惯量控制策略。【方法】首先, 通过理论分析揭示转动惯量与阻尼系数对系统稳定性的耦合影响规律; 在此基础上, 提出惯量与阻尼协同自适应算法。该算法通过实时监测频率偏差及其变化率, 动态调整转动惯量与阻尼系数的取值: 在频率波动初期增大惯量以抑制超调, 在恢复阶段降低惯量以加速调节; 同时, 引入带通阻尼功率反馈环节, 有效抑制稳态误差。【结果】仿真结果表明, 与传统固定参数控制相比, 该策略能有效降低频率超调量, 缩短调节时间, 且动态响应过程更为平滑, 系统在光照突变、负荷扰动等多工况下的稳定性均得到显著提升。【结论】所提出的惯量与阻尼协同自适应控制策略, 可根据系统频率动态特性实时优化VSG参数, 有效缓解含光伏电力系统的频率波动问题, 为高比例新能源并网系统的稳定运行提供了可行的技术途径。

关键词: 虚拟同步发电机; 转动惯量; 阻尼系数; 自适应控制

ABSTRACT: [Objectives] Traditional power grids rely on the inertial response of synchronous generators to maintain frequency stability. However, the volatility, low inertia, and frequency regulation delay of photovoltaic (PV) generation exacerbate frequency fluctuations and lead to insufficient dynamic response under sudden changes in illumination or load disturbances. Moreover, the fixed parameters of conventional virtual synchronous generators (VSG) struggle to adapt to multiple operating conditions. To address these issues and enhance the frequency stability and dynamic regulation performance of PV-integrated power systems, this study focuses on adaptive optimization of the VSG moment of inertia and damping parameters. [Methods] First, a theoretical analysis was conducted to reveal the coupling influence of moment of inertia and damping coefficients on system stability. Based on this, a cooperative adaptive algorithm for inertia and damping was proposed. This algorithm dynamically adjusts the moment of inertia and damping values by real-time monitoring of frequency deviation and its rate of change: increasing inertia during the initial stage of frequency fluctuations to suppress overshoot, and reducing inertia during the recovery phase to accelerate regulation. Additionally, a band-pass damping power feedback loop was introduced to effectively suppress steady-state error. [Results] Simulation results demonstrate that, compared to conventional fixed-parameter control, the

proposed strategy effectively reduces frequency overshoot, shortens regulation time, and achieves a smoother dynamic response. System stability under various operating conditions, such as sudden changes in illumination and load disturbances, is significantly improved. [Conclusions] The proposed cooperative adaptive control strategy for inertia and damping optimizes VSG parameters in real time based on system frequency dynamics, effectively mitigating frequency fluctuations in PV-integrated power systems. This provides a feasible technical approach for ensuring the stable operation of power systems with high penetration of renewable energy.

KEY WORDS: virtual synchronous generator; moment of inertia; damping coefficient; adaptive control

0 引言

在全球经济高速发展与生态环境保护矛盾日益激化的背景下,能源结构转型成为人类社会共同命题。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术是在电力电子设备中融入同步发电机(synchronous generator, SG)的动态方程特性,赋予分布式电源与同步发电机相似的惯性及阻尼属性。传统 VSG 策略模拟同步发电机特性,赋予并网逆变器虚拟惯量,缓解了其惯量阻尼缺失的问题。然而,该策略受限于虚拟惯量的范围^[1],加之惯量、阻尼等参数固定,致使控制缺乏足够的灵活性,需根据应用场景灵活调整,系统受扰时振荡加剧,恢复过程延长,动态响应性能受到制约。为解决固定参数 VSG 的适应性问题,研究人员提出参数自适应调整方法,旨在提升系统扰动后的恢复能力^[2]。同步发电机并网时,惯量、阻尼及线路阻抗等参数对有功功率的动态和稳态特性产生影响^[3-4]。文献[5-6]针对孤岛运行的 VSG 微网,分别提出单项参数调优策略,虽增强了一定抗扰能力,却未全面考量阻尼系数调整,存在局限。文献[7]针对含多光储 VSG 逆变器的孤岛微网,提出参数综合自适应算法,有效解决了多机并联时的功率协调难题,缩减了频率超调及调整时间。文献[8]设计了一种基于输出速度反馈的阻尼控制策略,响应迅速,有效抑制了功率振荡。文献[9]在三机九节点微网系统中验证了自适应惯量阻尼控制对频率响应的积极影响,增强了频率动态调控能力。文献[10]将滑模控制策略

引入 VSG 有功功率控制环,显著降低了大频率变化率。文献[11-13]设计了基于模糊控制的惯量自适应方法,参数调整连续无突变,但忽略了阻尼自适应,且采用恒定校正因子,频率恢复效果有限。文献[14]对此进行改进,提出校正因子变化的模糊自适应控制策略,根据频率值调整校正因子,加速了频率的稳定恢复。文献[15-16]则提出单一阻尼参数自适应控制策略,利用小信号建模实时调整阻尼,提升了系统稳定性。文献[17]提出了一种融入暂态电磁功率的 VSG 改进控制策略,该策略能减轻功率波动对系统稳态偏差的影响,并缩短动态调节过程的时间。文献[18-21]提出了虚拟惯量与阻尼协同自适应的 VSG 控制方法,该方法能够显著提升系统的响应速度和动态稳定性。

目前 VSG 自适应控制策略多局限于单参数调节模式,适配范围较窄,难以满足协调控制过程中惯性与阻尼的动态匹配需求。为弥补这一不足,本文提出一种基于带通阻尼功率反馈的自适应惯量控制策略,突破了固定惯量的应用局限,显著提升了系统阻尼性能。最终通过自适应惯量与带通阻尼反馈的有机融合,实现了控制结构的优化升级。

1 VSG 结构及原理

本文研究的 VSG 拓扑结构如图 1 所示,其中, U_{DC} 为理想电压源; L 为滤波电感; R 为滤波电阻; C 为滤波电容; Z_L 为线路阻抗; U_{CC} 为公共耦合点; U_g 为大电网。

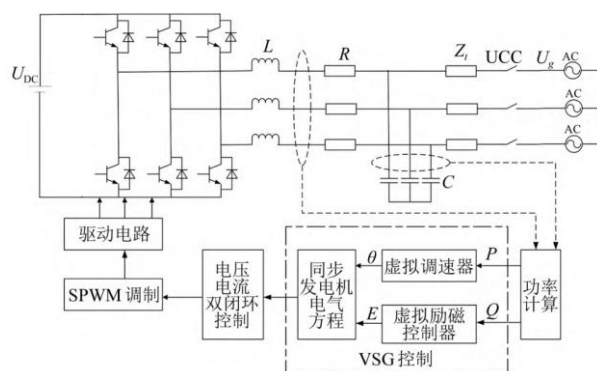


图 1 VSG 电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topology of VSG

VSG 控制体系基于同步发电机机电暂态特性构建, 包含有功-频率(P - f)与无功-电压(Q - U)双闭环控制模型。有功控制环节通过模拟转子运动方程引入虚拟惯量 J 与阻尼系数 D , 其数学模型为

$$J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

有功-频率下垂控制为

$$P_m = P_{ref} + K_p(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

定义 VSG 的功角表达式为

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_0 \quad (3)$$

无功-电压下垂控制公式为

$$U_{ref} = U + K_q(Q_{ref} - Q) \quad (4)$$

式中: ω 为虚拟角频率; ω_0 为电网额定角频率; P_m 为电磁功率; P_e 为输出有功功率; P_{ref} 为有功参考值; K_p 为有功下垂系数; δ 为功角; U_{ref} 为额定电压设定值; U 为实际机端电压输出; K_q 为无功调差系数。

由以上分析可得 VSG 的控制框图如图 2 所示, 通过 VSG 有功控制环和无功控制环输出的相位和电动势合成三相电压的相量值, 经电压-电流双闭环控制和 SVPWM 生成器输出控制脉冲, 驱动并网逆变器开关开断, 实现 VSG 并网的控制。

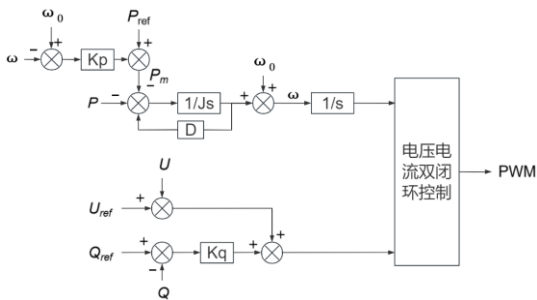


图2 VSG 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of VSG

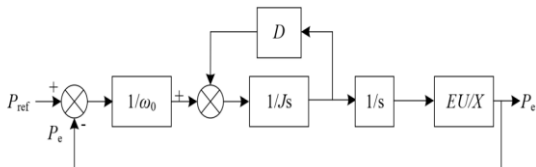


图3 VSG 有功功率闭环传递函数框图

Fig. 3 Block diagram of the closed-loop transfer function of VSG active power

图中, U 为电网电压; E 为 VSG 输出电压; X 为线路阻抗。

推导出有功功率闭环传递函数:

$$G(s) = \frac{\Delta P(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{\frac{EU}{X\omega_0}}{Js^2 + Ds + \frac{EU}{X\omega_0}} \quad (5)$$

阻尼比 ξ 和自然振荡角频率 ω_n 分别为:

$$\begin{cases} \xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{X\omega_0}{JEU}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{EU}{J\omega_0 X}} \end{cases} \quad (6)$$

进一步分析参数摄动对稳定性的影响, 图 4 为参数摄动时的系统特征根轨迹变化。鉴于 J 和 D 对系统稳定性具有不同影响, 设定 $J=0.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、 $1\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、 $2\text{kg}\cdot\text{m}^2$, D_m 在 $1\text{e}^3\omega_0 \sim 1\text{e}^4\omega_0\text{W}/(\text{rad/s})$ 范围内变动, 将这些值代入式(5)可得到 VSG 并网小信号模型的特征根轨迹。

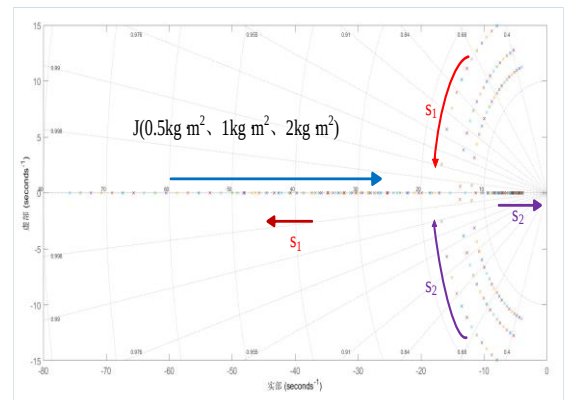


图4 参数摄动时的系统特征根轨迹变化

Fig. 4 Changes in the characteristic root trajectory of the system during parameter perturbation

当 J 从额定值增大, 系统极点沿复平面垂直方向向虚轴移动, 阻尼比降低, 动态响应趋于振荡; 减小 J 使极点远离虚轴, 系统惯性增强但响应速度下降。增大 D 使极点向实轴靠近, 阻尼效应增强, 但过度增加会使得极点进入过阻尼区域,

动态过程呈现缓慢单调特性。此外, J 与 D 的耦合效应体现在根轨迹的弯曲形态上: 当两者比例失调时, 极点可能进入右半平面, 引发失稳风险。

2 基于带通阻尼功率反馈的自适应惯量控制策略

2.1 自适应虚拟惯量控制

图5展示了VSG在小功率扰动作用下的功角 δ 与转子角频率 ω 的动态响应曲线。初始稳态时, 系统运行于平衡点 δ_0 , 对应有功功率 P_0 。当扰动引入后, 功角与转子频率进入衰减振荡过程, 其首个周期可划分为4个特征阶段, 分别对应不同的动态调节机制。

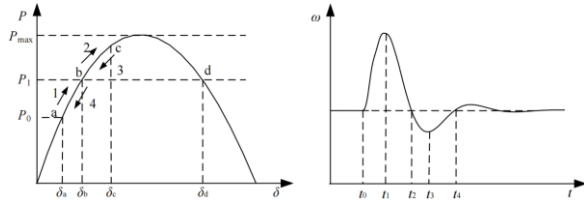


图5 功角和转子角频率振荡曲线

Fig. 5 Power angle and rotor angle frequency oscillation curve

第一阶段为扰动加速期($\delta_0 \rightarrow \delta_a \rightarrow \delta_b$): 扰动瞬间, 系统功率失衡导致 δ 由 δ_0 向 δ_a 加速偏移, ω 随之线性上升。此阶段中, 自适应控制算法检测到频率偏差率 $d\Delta f/dt$ 超过阈值, 迅速增大 J , 通过提高系统惯性延缓功角偏移速度, 抑制角频率的上升斜率。 D 按比例提升, 抵消因 J 增大引发的振荡加剧。

第二阶段为超调减速期($\delta_b \rightarrow \delta_c$): 功角达到首个峰值 δ_b 后, ω 达到最大值并开始下降, 系统进入减速阶段。此时, 自适应策略维持较高的 J 值以限制功角进一步偏移, 同时阻尼环节启动, 通过提取中频振荡分量动态增强阻尼效应, 促使 ω 快速衰减。此阶段末, 功角回落至 δ_c , ω 趋近于零, 标志振荡能量初步耗散。

第三阶段为反向恢复期($\delta_c \rightarrow \delta_d$): 由于剩余能量的惯性作用, 功角从 δ_c 反向偏移至 δ_d , ω 转为负向增长。此时自适应算法检测到频率偏差率反向超过阈值, 逐步降低 J 以提升系统响应速度,

同时依据阻尼的反馈信号动态调节 D , 抑制反向超调。

第四阶段为稳态收敛期($\delta_d \rightarrow \delta^*$): 功角由 δ_d 向新平衡点 δ^* 收敛, ω 振荡幅值持续衰减并趋近于零。在此阶段, 自适应策略进一步减小 J 以加速调节过程, 并通过阻尼功率反馈精准消除残余振荡, 确保功角与频率平稳过渡至稳态。

基于上述分析, J 的取值由角频率变化率及其角频率偏差确定, D 的取值则仅受角频率偏差的影响, 具体规则参见表1。

表1 惯量阻尼自适应控制参数调节原则

Tab. 2 Principle of adjusting parameters for inertia damping adaptive control

振荡阶段	$\omega - \omega_0$	$\frac{d\omega}{dt}$	虚拟惯量 J	阻尼系数 D
阶段 1	>0	>0	增大	减小
阶段 2	>0	<0	减小	增大
阶段 3	<0	<0	增大	减小
阶段 4	<0	>0	减小	增大

依据表1归纳的参数调整原则, 本文对VSG自适应控制的四个阶段实施分区处理, 并将 J 与VSG角速度变化量及角速度瞬时变化率相结合,

由表1中可以观察到, 当 $\omega - \omega_0$ 和 $\frac{d\omega}{dt}$ 同时大于零或者同时小于零时, 转动惯量 J 需要变大, 反之则需要变小, 所以让二者相乘, 乘积大于零时增大转动惯量 J , 在此基础上乘上大于零的调节系数, 符合表1的调节原则, 设计了如下的自适应控制算法:

$$J = \begin{cases} J_0 & \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq M \\ J_0 + \mu_J \frac{|\omega - \omega_0|}{\omega - \omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} & \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > M \end{cases} \quad (7)$$

式中: J_0 代表转动惯量的基准值; M 为角频率变化率的临界值; μ_J 为调节系数且大于0; J 为VSG实际应用的转动惯量值; ω 为VSG角频率; ω_0 为额定角频率。其控制机制如图6所示。

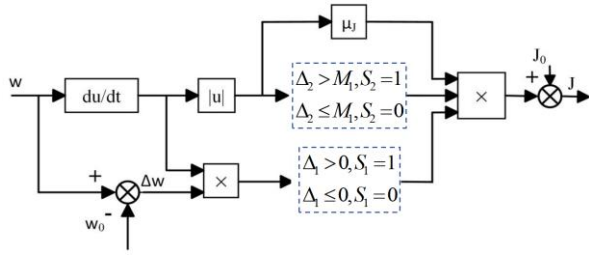


图6 惯量自适应控制原理图

Fig. 6 Principle diagram of inertia adaptive control

图中, du/dt 是对 ω 进行求导得出 $\frac{d\omega}{dt}$; $|u|$ 是得出 $\frac{d\omega}{dt}$ 的绝对值 $\left|\frac{d\omega}{dt}\right|$; 转动惯量 J 的自适应控制模块以角频率偏差 $\Delta\omega$ 及其变化率 $\frac{d\omega}{dt}$ 作为输入信号, 输出量为实时变化的转动惯量 J ; Δ_1 用于判断角频率偏差与变化率的乘积是否为正, 如果为正, 则 $S_1=1$, 反之 $S_1=0$; Δ_2 用于判断角频率变化率的绝对值是否超过预设阈值 M , 如果超过, 则 $S_2=1$, 反之 $S_2=0$ 。当且仅当上述 2 个条件同时满足时, 转动惯量 J 依据式(7)所示的规律进行动态调整, 否则, 系统将维持原有的转动惯量设置, $J=J_0$, 确保持续稳定的运行状态。

基于 VSG 响应速度的需求, μ_J 的取值需满足特定的约束条件。

由式(7)可知, μ_J 可表示为:

$$\mu_J = \frac{J - J_0}{\left|\frac{d\omega}{dt}\right|} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{J\omega_0} \quad (9)$$

因此, 由式(1)忽略阻尼项可得:

$$\mu_{J_{\max}} = \frac{J_{\max} - J_0}{\frac{d\omega}{dt}} \quad (10)$$

$$J_{\max} = \frac{\Delta P}{\Delta\omega\omega_0} \quad (11)$$

联立式(10)和(11)得:

$$\mu_{J_{\max}} = \frac{\frac{\Delta P}{\Delta\omega\omega_0} - J_0}{\left|\frac{d\omega}{dt}\right|} \quad (12)$$

在实际应用中, 需兼顾 VSG 的动态响应特性与外界扰动容忍范围, 建议 μ_J 取值区间为 $(0, 0.8\mu_{J_{\max}}]$ 。

2.2 带通阻尼功率反馈环节

传统 SG 凭借转子与定子磁场间的相互作用, 能自主检测电网角频率与本机输出角频率的差异, 并据此产生阻尼效应。相比之下, VSG 受限于其物理构造, 不具备直接感知频率偏差的自然机制, 故需依赖锁相环技术来监测电网频率, 从而获取频率偏差数据。针对此局限, 本文设计了一种改进方案, 即采用带通阻尼功率反馈的 VSG 控制架构, 具体如图 7 所示。

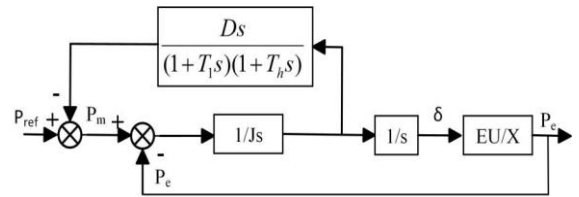


图7 基于带通阻尼功率反馈改进 VSG 控制框图

Fig. 7 Improved VSG control block diagram based on band-pass damping power feedback

输出有功功率 P_e 的传递函数表达式表述如下:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{e}{Js^2 + D(s)s + e} P_{ref} \\ &= \frac{a_1 s^2 + b_1 s + e}{as^4 + bs^3 + cs^2 + ds + e} P_{ref} \\ &= G_{pref}(s) P_{ref} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $a = T_1 T_h J$, $b = J(T_1 + T_h)$,

$c = J + D + T_1 T_h S_E$, $d = (T_1 + T_h)$, $e = S_E$,

$a_1 = T_1 T_h S_E$, $b_1 = (T_1 + T_h) S_E$

进而可得到系统实际输出的稳态有功功率 P_e 为

$$P_{e0} = \lim_{s \rightarrow 0} P_e = \lim_{s \rightarrow 0} G_{pref}(s) P_{ref} = P_m \quad (14)$$

式中, T_1 、 T_h 分别代表带通阻尼反馈通道的 2 个时间常数; 而 $1/T_1$ 、 $1/T_h$ 则分别对应其低截止频率和高截止频率。

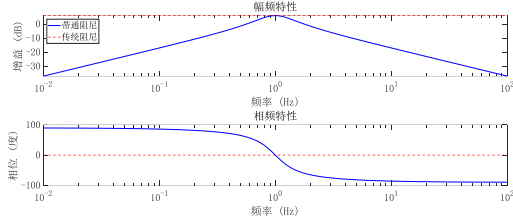


图 8 带通阻尼和传统常数阻尼反馈通道的伯德图

Fig. 8 Bode plots of band-pass damping and traditional constant damping feedback channels

图 8 展示了基于带通阻尼功率反馈的改进 VSG 控制策略与传统常数阻尼策略的伯德图对比。在低频段, 两种策略的幅频特性相近, 低频扰动下阻尼效果无明显差异; 在中频段, 带通阻尼曲线呈现显著的增益抬升, 有效抑制该频域内的功率振荡, 而传统常数阻尼的增益分布较为平坦, 对中频振荡的抑制能力有限。高频段中, 带通阻尼增益快速衰减, 避免高频噪声干扰, 而传统策略的增益仍维持较高水平, 可能引入额外相位延迟。针对传统常数阻尼应用于 VSG 控制的方案, 如图 9 所示, 系统特征方程含有一对接近虚轴的共轭复数根, 表明在此情况下, 仅下垂控制系数对振荡有一定的抑制作用, 而阻尼效果有限, 系统存在显著的振荡倾向。针对本文所提的基于带通阻尼功率反馈的 VSG 控制改进方案, 可通过式(13)推导出有功功率的小信号闭环传递函数:

$$G_{pref}(s) = \frac{P_e}{P_{ref}} = \frac{a_1 s^2 + b_1 s + c_1}{a s^4 + b s^3 + c s^2 + d s + e} \quad (15)$$

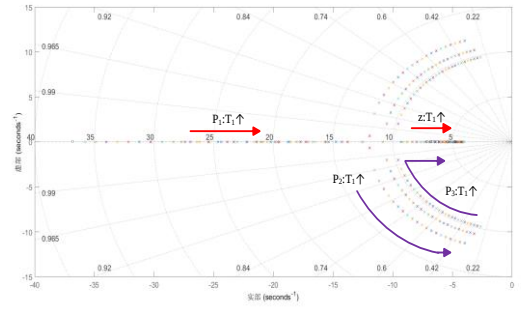


图 9 采用带通阻尼反馈通道的 VSG 零极点图

Fig. 9 VSG zero-pole diagram with bandpass damping feedback channel

为抑制高频干扰信号, 带通阻尼反馈通道的截止频点通常被配置于高频段。工程实践中, 该截止频点通常取开关频率的十分之一量级, 本文设定为 1 000 Hz, 对应时间常数 $T_h=0.16$ ms。当网络截止频点处于低频域时, 其极零点邻近虚轴, 显著影响系统稳定性与动态品质。图 9 展示了低频截止参数 T_1 增大时, 忽略高频极零点后的功率环零极点迁移规律, 可分为四个演化阶段:

初始阶段(T_1 较小时), 零极点 z 、 p_1 远离虚轴, p_2 、 p_3 成为主导极点, 其负虚部特性显著影响动态性能; T_1 增加, p_2 、 p_3 虚部逐步衰减, 零点 z 向虚轴移动, 可能引发超调现象; T_1 持续增大, p_3 与 z 形成偶极子结构, 其作用相互抵消, 此时 p_1 、 p_2 迁移轨迹受虚拟惯量参数主导, 系统呈现典型 VSG 动态特性; 最终阶段(T_1 极大化), 系统阻尼比下降, 需通过参数协同设计维持稳定性。优化设计时, 宜使系统工作于第三、四阶段, 此时虚拟惯量 J 与阻尼系数 D 独立调控系统特性。以 $D=2e4 \omega_0 W/(\text{rad/s})$ 为例, 当 $T_1=1.10$ s 时, 改进方案与传统方案均具有 $\zeta=0.707$ 的临界阻尼比。 p_3 与 z 构成的偶极子效应可忽略, 故可采用传统参数整定方法。

3 仿真实验

3.1 参数设置

为验证上述所提改进策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建了 VSG 并网模型, 相关参数如表 2 所示。

表 2 VSG 控制的仿真参数

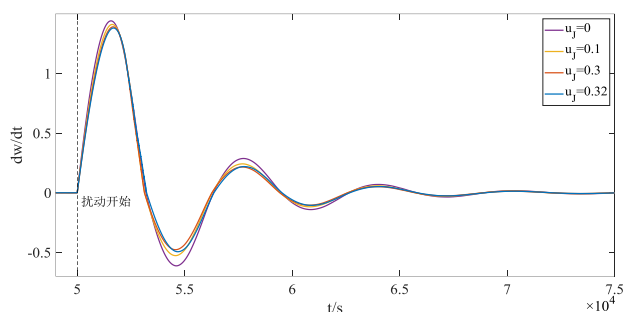
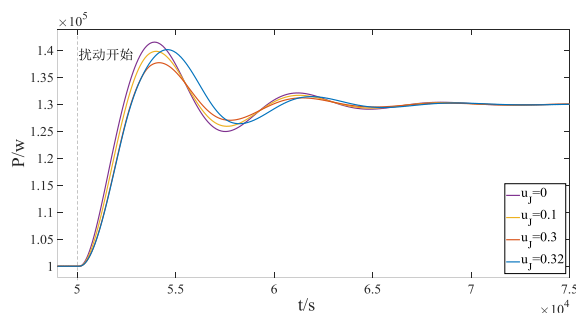
Tab. 2 Simulation parameters controlled by VSG

参数	取值	参数	取值
滤波阻抗 $Z1/\Omega$	$0.02-j0.0314$	VSG 额定功率/kW	150
线路阻抗 $ZL1/\Omega$	$0.2-j159.24$	虚拟惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3
额定频率/Hz	50	阻尼系数 $D/[N/(\text{m/s})]$	15
Load1/kW	20	LoadG/kW	150

3.2 自适应虚拟惯量控制策略多工况下的仿真验证

3.2.1 出力扰动

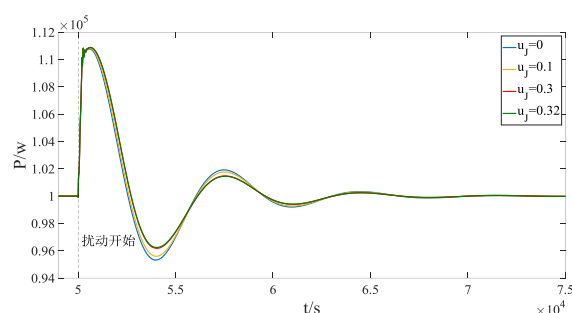
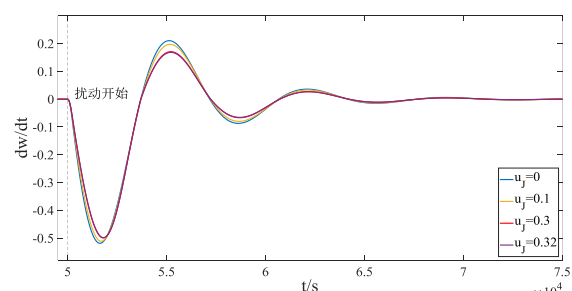
仿真条件设定：VSG 于 0 s 时并入电网，初始有功输出为 100 kW。在 5 s 时，有功输出增加至 130 kW，并保持至仿真结束，总仿真时长为 8 s。图 10 和图 11 分别展示了 VSG 并网运行时，不同的调节系数 μ_J 面对有功功率阶跃变化的暂态频率变化率和功率的响应特性。

图 10 μ_J 变化对频率变化率的影响Fig. 10 The effect of μ_J changes on the frequency rate of change图 11 μ_J 变化对功率的影响Fig. 11 The effect of μ_J changes on power

由图 10 与图 11 分析可见，当调节系数 μ_J 分别取 0、0.1 及 0.32 时，系统扰动后均出现高频振荡现象；而所提自适应控制策略在 $\mu_J=0.3$ 时，通过动态优化关键控制参数，展现出更优的暂态频率支撑性能。该策略显著缩减频率偏移幅值、缩短系统稳定时间，充分验证了其在抑制频率波动、提升系统动态稳定性方面的显著成效。

3.2.2 负载扰动

仿真条件设定：VSG 在 0 秒时携带 100 kW 负载 Load_G 并网运行，随后在 5 s 时接入额外 30 kW 负载 Load₁，整个仿真过程持续 8 s。图 12 与图 13 分别展示了不同 μ_J 条件下 VSG 并网运行时面对负载突变所展现的暂态频率变化率和功率的响应特性。

图 12 μ_J 变化对功率的影响Fig. 12 The effect of μ_J changes on power图 13 μ_J 变化对频率变化率的影响Fig. 13 The effect of μ_J changes on the rate of frequency change

由图 12 与图 13 分析可得，当最优控制参数 $\mu_J=0.3$ 时，系统在扰动初期快速提升虚拟惯量以抑制频率跌落幅度，且在恢复阶段动态适配阻尼系数，实现向稳态的平稳过渡。仿真结果验证，该自适应策略可有效实现惯量与阻尼的协同调控，显著缩减频率初始跌落幅度，缓解恢复阶段的超调问题，同时提升频率恢复速率，进而在保障频率稳定性的同时，降低暂态过程对电网的冲击影响。

3.3 基于带通阻尼功率反馈的自适应惯量控制策略多工况下的仿真验证

为了验证本文所提的基于带通阻尼功率反馈

的自适应惯量控制策略的有效性，在选择惯量自适应最佳参数 $\mu_1=0.3$ 基础上，加入带通阻尼反馈控制策略。在通过对比在相同工况下不同控制策略的表现，验证了所提改进策略在 VSG 并网系统遭遇有功输出扰动及网侧扰动时，对频率波动的优化效能。具体而言，VSG 控制策略采用了传统常数阻尼、暂态阻尼策略和基于带通阻尼功率反馈的改进 VSG 控制策略三种方案进行对比分析。

3.3.1 出力扰动

VSG 于 0 s 时刻并网运行，初始有功出力 150 kW，在 1.5 s 时有功出力降至 120 kW，随后在 3.5 s 时有功出力回升至 150 kW 并保持至仿真结束，整个仿真周期为 5 s。图 14 和图 15 分别展示了 VSG 并网系统在有功出力扰动下，不同阻尼控制策略的频率变化率和频率动态响应特性对比。

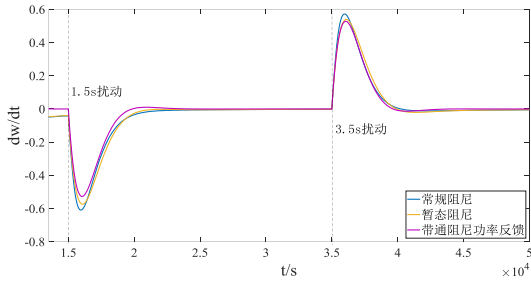


图 14 不同方案暂态频率变化率波动对比

Fig. 14 Comparison of the fluctuation rates of transient frequency changes under different schemes.

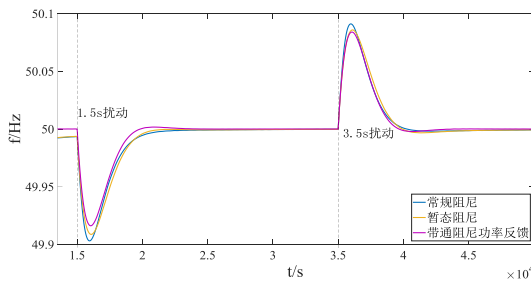


图 15 不同方案暂态频率波动对比

Fig. 15 Comparison of transient frequency fluctuations under different schemes.

由图 14、15 分析可见，基于带通阻尼功率反馈的改进策略通过频域滤波精准提取扰动特征，借助多频段协同优化机制，在中频段保持目标阻尼增益以平抑扰动初期的频率波动，同时在恢复阶段动态衰减高频干扰分量。该策略实现了阻尼

系数与惯量支撑的动态协同调控，有效缩减了频率初始偏差幅值，加快了系统恢复进程，且显著抑制了超调与振荡问题。仿真结果验证，所提方法通过频域功率的精准分配，显著提升了系统应对多时间尺度扰动的适应性，在强化动态抑制能力的同时保障了稳态精度。

3.3

2 网侧扰动

VSG 在 0 s 时并网运行，有功出力一直保持 150 kW 不变，1.5 s 时网侧频率下降 0.1 Hz，3.5 s 时网侧频率回升至 50 Hz，直至结束，仿真时长共 5 s。

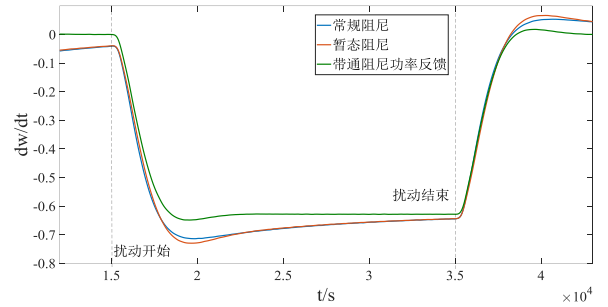


图 16 不同方案暂态频率变化率波动对比

Fig. 16 Comparison of transient frequency change rates fluctuations of different schemes.

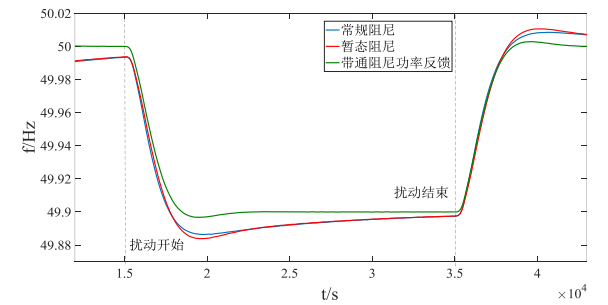


图 17 不同方案暂态频率波动对比

Fig. 17 Comparison of transient frequency fluctuations under different schemes.

由图 16 与图 17 分析可得，基于带通阻尼功率反馈的改进策略通过频域滤波与解耦控制机制，精准提取扰动分量并快速锁定关键频段能量。扰动发生后，该策略不仅显著压低频率偏差峰值，还能加速振荡能量的耗散进程。通过相位补偿机制，有效规避了传统方法因相位滞后引发的调节迟滞与反向波动问题，使频率响应曲线呈现平滑

收敛特征,且稳态恢复时间达到最短。实验结果验证,所提策略借助带通滤波与自适应阻尼的协同调控,在抑制频率振荡、提升系统动态稳定性方面具有显著优势,彰显出良好的工程应用价值。

4 结论

针对传统 VSG 固定参数导致的稳态误差与暂态波动,提出一种惯量与阻尼协同自适应控制算法,依据角频率偏差及其导数实时调整控制参数,并整合带通阻尼功率反馈机制以抑制稳态偏差。构建 VSG 并网小信号模型,探究了转动惯量与阻尼系数对系统动态性能的耦合影响规律。多场景仿真验证显示,该策略有效减少了频率超调,加速了系统调节进程,显著增强了系统的动态稳定与抗干扰能力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZHAO E S, HAN Y, ZHOU S Y, et al. Review and prospect of inertia and damping simulation technologies of microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1427.
- [3] 程冲,杨欢,曾正,等.虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J].电力系统自动化,2015,39(19): 82-89.
- [4] CHENG C, YANG H, ZENG Z, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [5] 曹昕鸢,韩珏.新能源虚拟同步机多参量自适应控制策略[J].电力电子技术,2022,56(3): 43-46.
- [6] CAO X Z, HAN J. Multi-parameter adaptive control strategy for new source virtual synchronous generator[J]. Power Electronics, 2022, 56(3): 43-46.
- [7] 彭词,胡丽蕊,张黎明,等.基于分布式 VSG 的微电网自适应阻尼控制[J].电力电子技术,2023,57(5): 85-88.
- [8] PENG C, HU L R, ZHANG L M, et al. Adaptive damping control of micro-grid based on distributed VSG[J]. Power Electronics, 2023, 57(5): 85-88.
- [9] 李昱磊,赵巧娥.基于自适应虚拟惯量的孤岛 VSG 频率动态响应控制[J].电气自动化,2021,43(2): 74-76.
- [10] LI Y L, ZHAO Q E. Island VSG frequency dynamic response control based on adaptive virtual inertia[J]. Electrical Automation, 2021, 43(2): 74-76.
- [6] 李彦哲,郭旭,董海鹰,等.独立微网中自适应转动惯量的 VSG 控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(12): 144-150.
- [7] LI Y Z, GUO X, DONG H Y, et al. VSG control strategy for adaptive rotational inertia in island micro-grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(12): 144-150.
- [7] 茆美琴,丁勇,胡健,等.含多光储 VSG 单元孤岛微网参数自适应功率协调与频率优化控制[J].电源学报,2020,18(6): 20-32.
- [8] MAO M Q, DING Y, HU J, et al. Parameter adaptive power coordination and frequency optimization of islanded microgrid with PV/battery VSG units[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 20-32.
- [8] 任海鹏,陈琦,张亮亮,等.虚拟同步发电机参数自适应调节[J].控制理论与应用,2020,37(12): 2571-2580.
- [9] REN H P, CHEN Q, ZHANG L L, et al. Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2571-2580.
- [9] 王淋,巨云涛,吴文传,等.面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J].中国电机工程学报,2021,41(13): 4479-4489.
- [10] WANG L, JU Y T, WU W C, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4479-4489.
- [10] 杨涛,廖勇,汤梦阳.改善含风电场虚拟惯量互联电力系统稳定性的自适应鲁棒滑模控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(9): 223-228.
- [11] YANG T, LIAO Y, TANG M Y. Adaptive robust-sliding mode control strategy for improving stability of interconnected power system with virtual inertia of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 223-228.
- [11] KERDPHOL T, WATANABE M, HONGESOMBUT K, et al. Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration[J]. IEEE Access, 2019, 7: 76071-76083.
- [12] 张涛,郑家琪,王福东,等.基于模糊控制的 VSG 转动惯量自适应算法[J].电力电子技术,2021,55(1): 74-76.

- 40-44.
- ZHANG T, ZHENG J Q, WANG F D, et al. VSG moment of inertia adaptive algorithm based on fuzzy control[J]. Power Electronics, 2021, 55(1): 40-44.
- [13] 吕彬, 茅大钧. 基于模糊理论的 VSG 自适应转动惯量控制策略[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 147-150.
- (LÜ/LV/LU/LYU) B, MAO D J. Adaptive moment of inertia control strategy of VSG based on fuzzy theory[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(5): 147-150.
- [14] 王晨丞, 蒲丽娟, 杜斌, 等. 基于新型模糊自适应惯量 VSG 的微网频率波动抑制[J]. 电气传动, 2022, 52(5): 14-20.
- WANG C C, PU L J, DU B, et al. Novel fuzzy adaptive inertia based virtual synchronous generator for microgrid frequency fluctuation attenuation[J]. Electric Drive, 2022, 52(5): 14-20.
- [15] 高飞翎, 钱凯, 李敏敏, 等. 基于自适应阻尼算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 109-114.
- GAO F L, QIAN K, LI M M, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive damping control algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 109-114.
- [16] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴. 微电网逆变器自适应阻尼系数 VSG 控制策略研究[J]. 控制工程, 2021, 28(8): 1628-1633.
- ZHU Z B, HUANG S P, LI Z X. VSG control strategy with adaptive damping coefficient for micro-grid inverter[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(8): 1628-1633.
- [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): 23-30.
- LAN Z, LIU Z T, HE D, et al. Active oscillation suppression strategy of paralleled virtual synchronous generators based on transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 23-30.
- [18] ZHANG M, MU L H, CHEN G Z, et al. A circulating current suppression strategy of VSG based on adaptive virtual complex impedance[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 228: 110065.
- [19] HE P, LI Z, JIN H R, et al. An adaptive VSG control strategy of battery energy storage system for power system frequency stability enhancement[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 149: 109039.
- [20] 王冰全. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器控制策略研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- WANG B Q. Research on control strategy of microgrid inverter based on virtual synchronous generator[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [21] LIN J C, LIU S Q, WANG G. Stability analysis and control parameter optimization of multi-VSG parallel grid-connected system[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 221: 109478.

收稿日期: 2025-06-20

作者简介:



卢源(1988), 男, 硕士, 研究方向为风力发电运维, 风电设备退化机理分析及其设备健康状态评估等, luyuan9@163.com;



谭翔天(2002), 男, 硕士, 研究方向为新能源并网发电并网一次调频研究, 1798319855@qq.com;



文孝强(1979), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电与电网支撑技术; 人工智能技术及其在能源电力行业应用等, 本文通信作者, 148088591@qq.com;



王建国(1979), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能测控技术及装置; 污垢监测理论及技术; 计算机网络控制技术, 397625835@qq.com;



贺雪冰(1998),女,硕士,
研究方向为微网中基于
VSG的光储调频控制策略,
703350123@qq.com;



孙晓宁(1999),女,硕士,
研究方向为新能源发电光储
一次调频,
sunxiaoning9999@163.com。

(责任编辑 辛培裕)