

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250038

计及频率动态响应的 VSG 自适应暂态稳定控制策略

张瀚宇¹, 盘宏斌¹, 陈燕东², 罗聪², 徐嘉诚², 谭文博¹

(1. 湘潭大学自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 国家电能变换与控制工程技术研究中心 (湖南大学), 湖南 长沙 410082)

摘要: 电网大扰动故障下, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)存在严重的暂态失稳风险。其中功角稳定和频率稳定是 VSG 安全稳定运行的两个重要因素, 而现有文献缺少对这两个问题的综合考虑。为此, 首先建立 VSG 大信号等值模型, 分析不同故障深度下 VSG 控制参数对暂态功角稳定性和频率稳定的影响, 揭示了功角稳定和频率稳定之间的矛盾。然后, 提出了一种基于角频率负反馈的自适应暂态控制策略。该方法通过引入虚拟惯量、虚拟阻尼和有功参考功率重塑 VSG 暂态特性, 进而增强功角稳定和频率稳定。为了进一步优化系统暂态特性, 给出一种计及频率动态响应的控制参数设计方法并定量刻画参数可行域。最后, 通过 Simulink 仿真与 RT-Lab 半实物实验, 验证了所提方法及参数设计的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 暂态稳定; 功角稳定; 频率稳定; 动态响应

VSG adaptive transient stability control strategy considering frequency dynamic response

ZHANG Hanyu¹, PAN Hongbin¹, CHEN Yandong², LUO Cong², XU Jiacheng², TAN Wenbo¹

(1. School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082, China)

Abstract: Under large disturbances in power grids, virtual synchronous generators (VSG) face a high risk of transient instability. Among them, power angle stability and frequency stability are two key factors for ensuring safe and stable VSG operation. However, existing studies seldom consider these two aspects in an integrated manner. To address this gap, a VSG large signal equivalent model is first established, and the influence of VSG control parameters on transient power angle stability and frequency stability under different fault depths is analyzed, revealing the inherent conflict between the two stability objectives. Subsequently, an adaptive transient control strategy based on angular frequency negative feedback is proposed. By introducing virtual inertia, virtual damping, and virtual power reshaping, this method enhances both rotor angle stability and frequency stability. To further optimize the transient performance, a control parameter design method that accounts for frequency dynamic response is proposed, along with a quantitative characterization of the feasible domain of parameters. Finally, the effectiveness of the proposed method and parameter design is verified through Simulink and RT-Lab hardware-in-the-loop (HIL) platform.

This work is supported by the Key Project of Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2024JJ3012).

Key words: virtual synchronous generator; transient stability; power angle stability; frequency stability; dynamic response

0 引言

在“碳达峰、碳中和”目标的驱动下, 随着以风电、光伏等新能源为代表的分布式能源大规模接入电网, 传统同步发电机在电网中的占比逐步降低, 我国电力系统在未来将呈现“高比例可再生能源”

和“高比例电力电子设备”的“双高”电力系统特征^[1]。传统以跟网型变流器为并网接口的新能源几乎不具备类似同步发电机的支撑特性, 新型电力系统抗干扰、维持稳定运行的能力减弱^[2]。在此背景下, 构网型变流器应运而生。构网型技术可通过模拟同步发电机的阻尼和惯量特性, 使并网逆变器具有类似于同步发电机的有功-频率和无功-电压特性, 为系统提供频率和电压控制^[3-7]。

基金项目: 湖南省自然科学基金重点项目资助(2024JJ3012)

当电网出现扰动, 如负荷波动或者短路故障时, 与同步发电机类似, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)系统将面临失稳的问题。目前, 针对 VSG 的研究主要集中于小扰动稳态运行方面^[8-11], 其中主要包括单个与多个 VSG 机组的建模与简化、控制参数设计、控制策略的改进与稳态特性分析等。而当电网遭受大扰动故障时, 一方面, 由于输出功率的不平衡, 削弱了系统的功角稳定性; 另一方面, VSG 在引入阻尼和惯量特性的同时也表现出了同步发电机(synchronous generator, SG)的转子振荡特性, 使 VSG 系统极易产生频率失稳问题, 二者相互影响, 最终可能导致系统功角失去同步, 频率发生崩溃^[12]。因此, 综合研究 VSG 在大扰动故障下的暂态功角稳定和系统频率稳定能力, 是发展虚拟同步发电机控制技术的关键。

目前, 在 VSG 暂态稳定性的研究中, 如何增强其暂态功角稳定性已成为关键课题。文献[13]分析了 VSG 的惯量和阻尼对增强并网暂态功角稳定性的有效性。文献[14]提出了一种调节 VSG 惯量和阻尼的控制策略以提升暂态稳定能力。文献[15]提出一种减小故障期间有功指令的 VSG 暂态功角稳定性增强方法。文献[16]基于对多种控制类型电压型逆变器暂态行为的分析, 提出了一套用于增强系统阻尼与暂态稳定性的逆变器参数设计方法。为分析暂态功角失稳时伴随的限流问题, 文献[17]考虑了故障限流与功角稳定的内在关联性。文献[18]在同时考虑故障限流与功角稳定的基础上, 提出了一种兼顾轻度故障和重度故障的暂态功角稳定控制方法。此外, 文献[19]和文献[20]分析了 VSG 多机并联系统产生的暂态功角稳定性问题。

而对于暂态频率稳定性, 是指在受到扰动后系统频率能够恢复并保持稳定的能力。电力系统频率的稳定性依赖于系统对频率变化的响应能力, 主要体现在角频率偏差($\Delta\omega$)和频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)两个重要指标上。良好的频率

动态响应能力可以提高系统的频率稳定性, 反之则可能导致 VSG 故障频率冲击加大, 电力系统失稳风险增加。因此, VSG 的频率问题成为新能源快速发展下的重要难题之一, 必须得到重视。针对这一问题, 文献[21]从暂态频率问题演变过程的角度探究其核心问题, 为提出暂态频率控制方法提供了理论指导。文献[22]提出了一种自适应惯性和阻尼的调节方法, 以提升 VSG 在负荷扰动情况下的频率响应。文献[23]提出了一种结合虚拟电感的多参数自适应协调与频率优化控制方法, 有效改善了电网故障时 VSG 的暂态频率动态特性。文献[24]提出了一种加快 VSG 频率动态响应速度的模糊自适应方法, 实现了频率主动支撑。上述文献均通过动态调节系统参数以抑制频率偏差, 但忽略了不同故障深度下控制参数自身调节对 VSG 暂态频率稳定的影响。

上述文献中, 功角稳定和频率稳定被视为两个独立的问题来处理, 顾此而失彼。在 VSG 系统设计和运行中, 需要综合考虑暂态稳定性和频率稳定性, 以确保并网系统在不同故障深度下能够安全和可靠运行。文献[25]通过附加额外的频率控制环节保证了 VSG 的暂态稳定, 但其未对频率响应进行约束, $\Delta\omega$ 和 RoCoF 等参数可能存在超调。文献[26]设置了频率响应的阈值条件作为参考以调节惯量和阻尼参数, 但在重度故障下难以保障系统稳定。文献[27]以响应特性为依据, 自适应地切换有功控制模式, 使 VSG 可在重度故障下保持稳定运行, 然而其控制中识别信号的提取与模式切换的判断过程较为复杂, 因此难以投入实际应用。

表 1 从大扰动故障下 VSG 的暂态功角稳定性、暂态频率稳定性、最优暂态性能和复杂程度 4 个方面对上述现有暂态控制方法进行了比较。

结果表明, 目前尚缺少适用于电网不同故障深度下兼顾暂态功角稳定性和暂态稳定性, 同时可使 VSG 获得最优暂态性能的研究。针对上述问题, 本文基于 VSG 参数灵活可调的特性, 提出一种适用于

表 1 不同暂态控制的比较

Table 1 Comparison among different transient controls

控制方法	VSG 暂态控制评估标准					
	暂态功角稳定性		暂态频率稳定性		最优暂态性能	低复杂度
	轻度故障	重度故障	轻度故障	重度故障		
参数直接调节 ^[14-15,17-20]	✓	×	×	×	×	✓
参数自适应调节 ^[22-24]	×	×	✓	×	×	✓
附加回路控制 ^[25-26]	✓	×	✓	×	×	✓
控制模式切换 ^[27]	✓	✓	✓	✓	×	×
所提控制	✓	✓	✓	✓	✓	✓

电网大扰动故障情况下 VSG 的自适应暂态控制策略, 该策略可在增强系统暂态频率稳定性的同时保持暂态同步稳定。首先, 本文建立 VSG 基本模型, 采用相轨迹法和频域分析法分别分析了不同故障深度下虚拟惯量、阻尼和有功参考功率对暂态功角稳定性和频率稳定性的影响; 其次, 提出一种计及频率动态响应的暂态功角稳定性增强方法, 以提升 VSG 的综合暂态稳定性能; 然后, 给出一种适用于不同故障深度下最优暂态稳定区间的设计方法, 并准确刻画参数可行域; 最后, 通过仿真和实验验证了本文所提控制策略可有效提升系统的暂态功角和频率稳定性。

1 VSG 大信号建模

1.1 电路拓扑及控制结构

图 1 给出了 VSG 电路拓扑图及控制结构框图。其中: U_{dc} 为 VSG 直流侧电压; L_f 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容; L_g 为电网侧线路电感; u 为 PCC 处电压; i 为 VSG 输出电流; U_g 为电网电压。

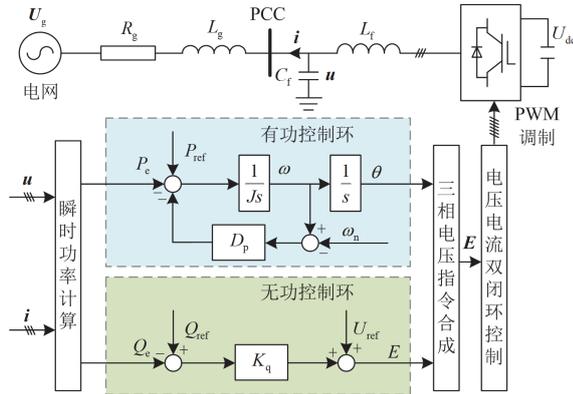


图 1 VSG 电路拓扑及控制结构

Fig. 1 VSG circuit topology and control structure

VSG 控制结构包括有功频率控制环和无功电压控制环, 其表达式为

$$J \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_c - D_p (\omega - \omega_n) \quad (1)$$

$$E = K_q (Q_{ref} - Q_c) + U_{ref} \quad (2)$$

式中: J 、 D_p 分别为 VSG 的虚拟转动惯量和阻尼系数; ω 和 ω_n 分别为 VSG 的角速度和额定角速度; P_{ref} 、 P_c 分别为 VSG 有功功率的指令值和实际值; Q_{ref} 、 Q_c 分别为 VSG 无功功率的指令值和实际值; E 、 U_{ref} 分别为 VSG 的内电势输出电压幅值与给定电压指令值; K_q 为 VSG 的无功下垂调压系数。一般

来说, 功率内环的动态响应速度比功率外环快十几倍^[28-29], 因此可忽略电压电流控制内环动态特性的影响。若以电网电压为参考零相量, 则 U_g 与 E 的相位差为 θ , 可得电网电压相量 U_g 为 $U_g \angle 0$, VSG 电压相量 E 为 $E \angle \delta$, $\delta = \theta$, δ 为 VSG 与电网之间的相位角之差, 定义为功角。由此可得 VSG 向电网传输的有功功率和无功功率分别为

$$P_c = \alpha E^2 + \beta U_g E \sin \delta - \alpha U_g E \cos \delta \quad (3)$$

$$Q_c = \beta E^2 - \alpha U_g E \sin \delta - \beta U_g E \cos \delta \quad (4)$$

式中: $\alpha = \frac{R_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}$, $\beta = \frac{X_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}$, 其中 R_{eq} 和 X_{eq}

分别表示 VSG 到电网之间的等值电阻和等值电抗。

1.2 VSG 大信号模型

将式(4)代入式(2)可推出 VSG 内电势 E 与系统功角 δ 的关系如式(5)所示。

$$E = \frac{K_q U_g \cos \delta - X_g}{K_q} + \frac{1}{K_q} \sqrt{\left[(K_q U_g \cos \delta - X_g)^2 + 4K_q X_g (U_{ref} + K_q Q_{ref}) \right]} \quad (5)$$

联立式(5)、式(3)与式(1), 可得到考虑无功环作用时 VSG 关于 δ 的二阶微分方程为

$$J \omega_n \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \omega_n \frac{d\delta}{dt} + \frac{U_g^2 \sin 2\delta}{2X_g} - \frac{U_g \sin \delta}{K_q} - P_{ref} + \frac{U_g \sin \delta \sqrt{\left[(K_q U_g \cos \delta - X_g)^2 - 4K_q X_g (U_{ref} + K_q Q_{ref}) \right]}}{K_q X_g} = 0 \quad (6)$$

令状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [\delta, \Delta\omega]^T$, 由式(6)可得 VSG 的大信号模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{P_{ref} - \beta U_g E \sin x_1 - D x_2}{J} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(3)可得 VSG 的功角曲线, 如图 2 所示。图中 k 表示电网电压跌落系数, 为电网故障电压与额定电压之比。由图 2(a)可知, 在系统正常运行的情况下, a 点为 VSG 的稳态运行点。当故障发生时, 根据功角曲线与平行于横轴的直线 $P_c = 1 \text{ p.u.}$ 是否有交点, 即有无平衡点将故障分为 I 型轻度故障和 II 型重度故障两类。存在两个平衡点的曲线代表 I 型轻度故障功率-功角曲线, 随着故障程度的加重, 导致功率-功角曲线幅值被压缩, 曲线的交点随之变少。存在一个平衡点的曲线代表区分 I 型轻度

型重度故障的临界功率-功角曲线, 没有平衡点的曲线代表 II 型重度故障功率-功角曲线。从图 2(b)中可以看出, 即 $k > 0.325$ 时系统处于 I 型轻度故障, $k < 0.325$ 时系统处于 II 型重度故障。对于 I 型轻度故障, 以蓝色曲线为例, 故障发生后 VSG 立即从 a 点移动到 b 点运行, 若运行至 g 点前 ω 减小到 ω_n , 则 VSG 将稳定于 d 点; 若在 g 点附近仍存在 $\omega > \omega_n$, 则运行点将越过 g 点, VSG 暂态失稳。而对于 II 型重度故障, 由于不存在有功输出平衡点, 则 $P_e < P_{ref}$ 始终成立, δ 将一直增大, 若不及时切除故障, 则 VSG 必将暂态失稳。

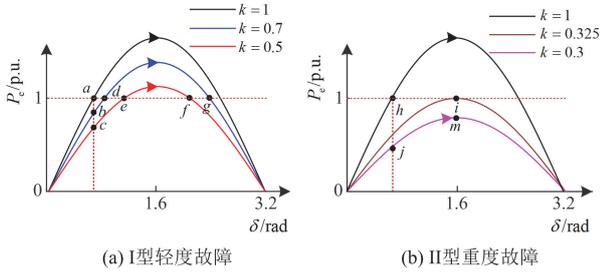


图 2 不同故障深度下 VSG 的功角曲线

Fig. 2 $P-\delta$ curves of VSG with different fault depths

2 VSG 暂态稳定性分析

通过上述分析可知, 电网电压跌落将打破 VSG 原有有功功率输入与输出的平衡, 从而导致 VSG 暂态失稳。下面采用相轨迹法和频域分析法分析在不同故障深度下虚拟惯量 J 、虚拟阻尼 D_p 和有功参考功率 P_{ref} 对暂态功角稳定性和暂态频率动态响应的影响。

2.1 VSG 暂态功角稳定性分析

根据式(6), 分别绘制了 I 型轻度和 II 型重度故障下不同 J 、 D_p 和 P_{ref} 的相轨迹图, 如图 3 所示。可以看出, 在 I 型轻度故障下, 当仅 J 变化时, J 越大, 功角最大偏差 $\Delta\delta_{max}$ 越大, VSG 最终会暂态失稳; 当仅 D_p 变化时, D_p 越小, $\Delta\delta_{max}$ 越大, VSG 最终会暂态失稳; 当仅 P_{ref} 变化时, P_{ref} 越小, $\Delta\delta_{max}$ 越小, VSG 保持暂态稳定。II 型重度故障下, J 和 D_p 变化时 VSG 皆暂态失稳, 但随着 P_{ref} 的减小, VSG 将逐渐恢复稳定, 同时 $\Delta\delta_{max}$ 减小。因此, 减小 J 、增大 D_p 以及减小 P_{ref} 有利于增强 VSG 的暂态功角稳定性。

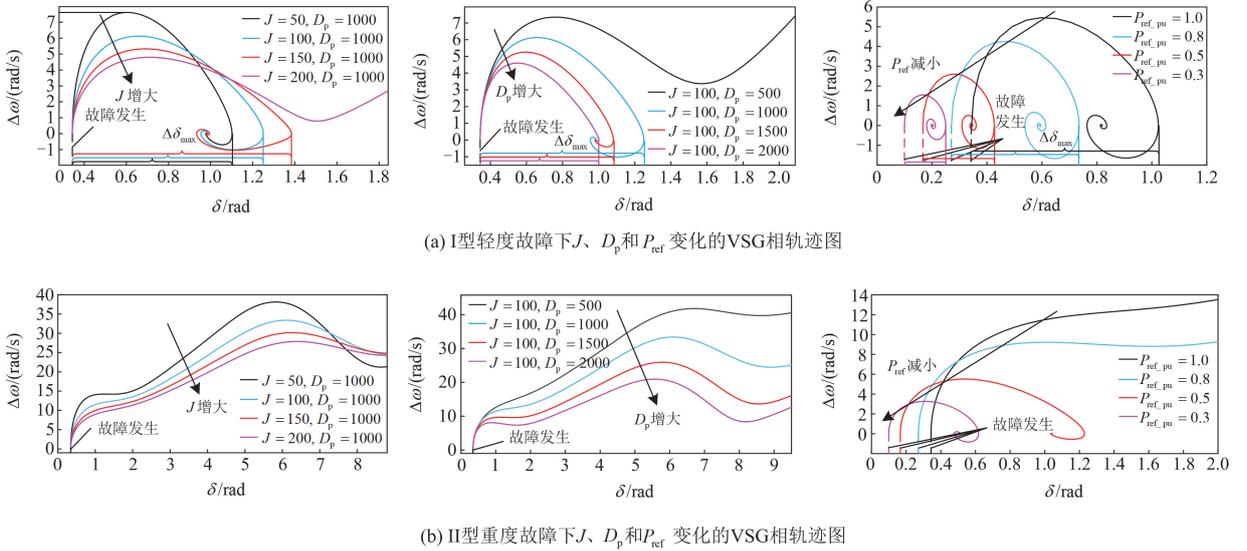


图 3 不同故障深度下 VSG 相轨迹图

Fig. 3 Phase portraits of VSG with different fault depths

2.2 VSG 频率响应分析

根据式(6)及图 1 所示有功控制环, 可得 $\Delta\omega$ 的传递函数为^[30]

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{s}{Js^2 + D_p s + G} \quad (8)$$

式中: G 为 P_e 与 δ 之间的近似增益。对式(8)采用频

域分析法, 得到自然振荡频率 ω_n 和阻尼比 ζ 分别为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{G}{J}} \\ \zeta = \frac{D_p}{2} \sqrt{\frac{1}{JG}} \end{cases} \quad (9)$$

通常情况下, VSG 工作在欠阻尼 ($0 < \zeta < 1$) 状态, 则 VSG 典型二阶系统响应可以表示为

$$\begin{cases} c(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \gamma) \\ c'(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: 令 $\sin \gamma = \sqrt{1-\zeta^2}$ 。

则由式(8)一式(10)得 $\Delta\omega$ 的响应为

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{JG}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \quad (11)$$

对式(11)求导, 设 ρ_F 表示频率变化率 RoCoF, 可得其响应为

$$\rho_F(t) = \frac{1}{J\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\gamma - \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \quad (12)$$

当 $\rho_F = 0$ 时, $\Delta\omega(t)$ 取得最大值, 可得 $\Delta\omega_{\max}$ 为

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{2\zeta}{D_p \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \frac{\arcsin \sqrt{1-\zeta^2}}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \approx \frac{2\zeta}{D_p} e^{-\zeta} \quad (13)$$

同样地, 当 $t=0$ 时, 频率变化率 RoCoF 取得最大值, 此时有

$$\rho_{F \max} = \frac{1}{J} \quad (14)$$

综上所述, 虚拟惯量 J 、阻尼系数 D_p 和有功参考值 P_{ref} 同时影响着 VSG 的暂态功角稳定和频率响应速率。其中, 增大 J 有助于减小 $\Delta\omega_{\max}$ 和 $\rho_{F \max}$, 但恶化了 VSG 的暂态功角稳定性; 增大 D_p 有助于减小 $\Delta\delta_{\max}$, 但过大的 D_p 会带来过低的频率响应, 导致系统反应速度过慢, 反应时间大幅延长; P_{ref} 降低导致有功输出降低, 过低的有功输出可能触发过流保护, 导致系统频繁停机, 影响正常运行。

上述理论分析说明了参数 J 、 D_p 和 P_{ref} 对于暂态功角稳定性与暂态频率响应的影响存在不一致性, 证明 VSG 在维持暂态功角稳定与最佳暂态频率响应之间存在矛盾。

3 所提 VSG 自适应频率优化控制策略

为对暂态功角稳定性与暂态频率响应二者之间进行协调控制, 在增强 VSG 暂态功角稳定性的同时, 提升其暂态频率响应速率, 提出一种计及频率动态响应的暂态功角稳定性增强方法。

3.1 VSG 暂态功角稳定性分析

电网故障期间, 将图 4 中 VSG 的 $\Delta\omega$ 与 $d\Delta\omega/dt$

通过图中红色方框的负反馈环节接入有功环, 由此可得改进后的 VSG 有功环控制方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} + K_d \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} = -(D_p + K_p) \Delta\omega + (P_{\text{ref}} - K_i \int \Delta\omega dt) - P_c \quad (15)$$

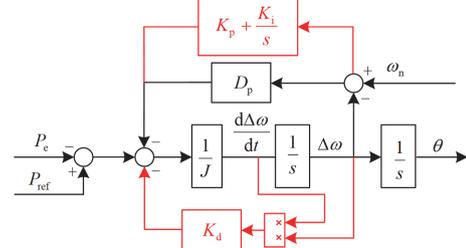


图 4 VSG 自适应频率优化控制

Fig. 4 VSG adaptive frequency optimization control

根据式(16), VSG 系统改进后的等效虚拟惯量 J_{eq} 、等效虚拟阻尼 D_{eq} 和等效有功参考值 $P_{\text{ref_eq}}$ 可分别表示为

$$J_{\text{eq}} = J + K_d \Delta\omega \quad (16)$$

$$D_{\text{eq}} = D_p + K_p \quad (17)$$

$$P_{\text{ref_eq}} = P_{\text{ref}} - K_i \int \Delta\omega dt \quad (18)$$

从式(16)一式(18)可以看出, 所引入控制参数中 K_p 增强了系统虚拟阻尼; K_i 和 K_d 为频率动态响应参数, K_i 可动态调节和补偿 P_{ref} 与 P_c 之间的不平衡, K_d 可依据 $\Delta\omega$ 调节系统虚拟惯量。上述参数通过重塑 VSG 有功特性的方式以改善系统的暂态行为。

3.2 所提控制暂态功角稳定性分析

为详细分析控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 对系统暂态稳定性的作用, 结合式(7)和式(15), 设状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [\delta, \Delta\omega]^T$, 可得所提控制的二阶大信号模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ [P_{\text{ref}} - K_i x_1 - P_c - (D_p + K_p) x_2] / (J + K_d x_2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(3)、式(4)和式(19)可得改进后的暂态特性如图 5 所示, 改进后的频率响应曲线如图 6 所示。在本文所提控制中, 由于 K_p 和 D_p 的作用相同, 可参考 2.1 节中的理论描述, 这里不再单独分析。从图 5 可以看出, 故障期间随着 K_i 的增大, 等效有功参考功率减小, 从而抑制由故障带来的有功不平衡问题, VSG 暂态稳定能力得以增强。由图 6 可知, 随着 K_d 的增大, $\rho_{F \max}$ 随之减小, VSG 暂态频率稳

定性增强。但 K_d 的增大最终会导致系统暂态失稳。

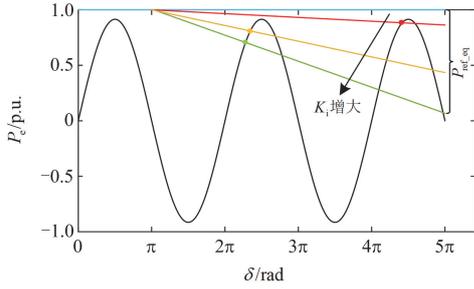


图 5 不同 K_i 的改进 VSG 的暂态性能

Fig. 5 Transient performances of improved VSG with different K_i

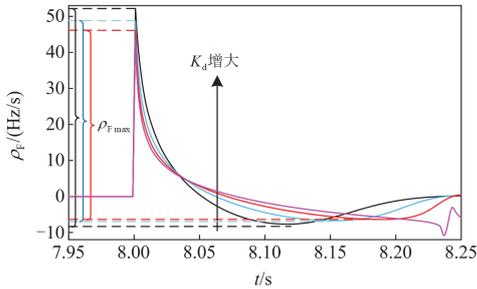


图 6 不同 K_d 的改进 VSG 的频率响应曲线

Fig. 6 Frequency response of improved VSG with different K_d

进一步分析, 根据式(19), 可得到不同故障深度下 VSG 的相轨迹图, 如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出, K_p 和 K_i 的增加都可以增强系统暂态稳定性, 虽然 K_d 增加使 $\Delta\omega$ 减小, 但将逐渐导致系统暂态失稳。从图 7(b)中可以看出, 当电网故障程度较深时, 虽然 K_p 和 K_d 的增加使 $\Delta\omega$ 减小, 但所有相轨迹图最终都会发散, 即功角失稳。而参数 K_i 的引入抑制了由故障导致的有功不平衡, 改善了系统的暂态性能。这表明参数 K_i 对 VSG 系统最终重新实现暂态同步稳定起到了重要的作用。

3.3 所提控制策略频率响应分析

根据第 2.4 节, 对所提控制策略进行频率响应分析, 可得

$$\begin{cases} \rho_{F \max} = \frac{1}{J + K_d \Delta\omega} \\ \Delta\omega_{\max} \approx \frac{2\zeta}{D_p + K_p} e^{-\zeta} \\ \zeta = \frac{D_p + K_p}{2} \sqrt{1 / (J + K_d \Delta\omega)(K_i + G)} \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知, $\Delta\omega_{\max}$ 与 $\rho_{F \max}$ 不仅与 J 和 D_p 有关, 而且与所引入的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 有关。 K_p 越大等效阻尼 D_{eq} 越大, 因此增大 K_p 有助于减小

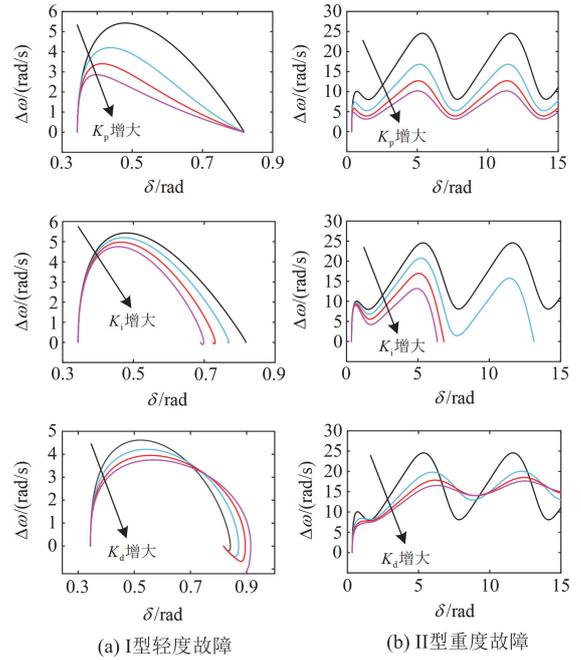


图 7 不同故障深度下改进 VSG 的相轨迹图

Fig. 7 Phase portraits of improved VSG with different fault depths

$\Delta\omega_{\max}$; K_i 越大阻尼比 ζ 越小, ζ 越小, $\Delta\omega_{\max}$ 越小, 因此增大 K_i 有助于减小 $\Delta\omega_{\max}$; K_d 越大等效惯量 J_{eq} 越小, 因此增大 K_d 有助于减小 $\rho_{F \max}$ 。综上所述, 通过调节 K_p 、 K_i 和 K_d 可使 VSG 在两种故障深度下拥有更快的频率响应特性。

3.4 自适应频率优化控制参数可行域

前述分析已经证明了所提改进 VSG 控制策略的有效性, 不难看出控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 通过改变 VSG 系统等效惯量、等效阻尼和等效有功参考值的方式对系统的暂态稳定性进行调节。因此, 为了在维持暂态功角稳定的同时使 VSG 系统拥有最佳频率动态响应特性, 获得最优的暂态性能, 需要合理设计控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的数值。

参数设计流程如图 8 所示。首先, 初始化 K_p 、 K_i 和 K_d 。通过 MATLAB 命令 ODE45 求解式(19)并计算频率动态响应参数 $\rho_{F \max}$ 、 $\Delta\omega_{\max}$ 和 ζ 以及功角偏差 $\Delta\delta$; 然后, 优先判断 $\rho_{F \max}$ 和 $\Delta\omega_{\max}$ 是否满足并网条件^[21], ζ 是否为最优阻尼比 0.707, 通过迭代循环计算, 求得满足并网条件的 K_p 、 K_i 和 K_d ; 最后, 以 $\Delta\delta$ 是否为 0 判断功角稳定性。通过迭代计算, 求得不同故障深度下满足暂态功角、频率稳定以及并网条件的 K_p 、 K_i 和 K_d 参数可行域。为了

使系统获得最佳频率动态响应，由式(20)可知，需在保证系统稳定的情况下，使参数 K_p 和 K_d 尽可能大；为了保证功率传输，参数 K_i 应尽可能的小。因此基于已求解出的参数可行域可设计优化问题并进行求解。首先，设置 $\text{Max_}K_p$ 、 $\text{Max_}K_i$ 和 $\text{Max_}K_d$ 3 个参数并初始化，读取一组 (K_p, K_i, K_d) 参数，然后依次判断 K_p 是否大于当前的 $\text{Max_}K_p$ ， K_i 是否大于当前的 $\text{Max_}K_i$ ，以及 K_d 是否小于当前的 $\text{Max_}K_d$ ，根据判断结果，更新相应最大值或最小值；接着检查是否还有未处理的数据，如果有，则

返回继续读取下一组参数并重复上述判断和更新过程；如果没有则输出最终的 $\text{Max_}K_p$ 、 $\text{Max_}K_i$ 和 $\text{Max_}K_d$ 。

依据图 8 的设计流程，分别绘制出 I 型轻度故障和 II 型重度故障下所提 VSG 优化控制策略同时满足最佳频率动态响应和维持暂态功角稳定的 K_p 、 K_i 和 K_d 取值范围，如图 9 所示。图中，灰色区域代表维持功角稳定的取值范围，橙黄色、绿色和蓝色区域代表满足频率动态响应的取值范围，红色代表综合考虑暂态功角稳定和频率动态响应的取值范围，黑色圆点表示控制参数可取得的最优解。

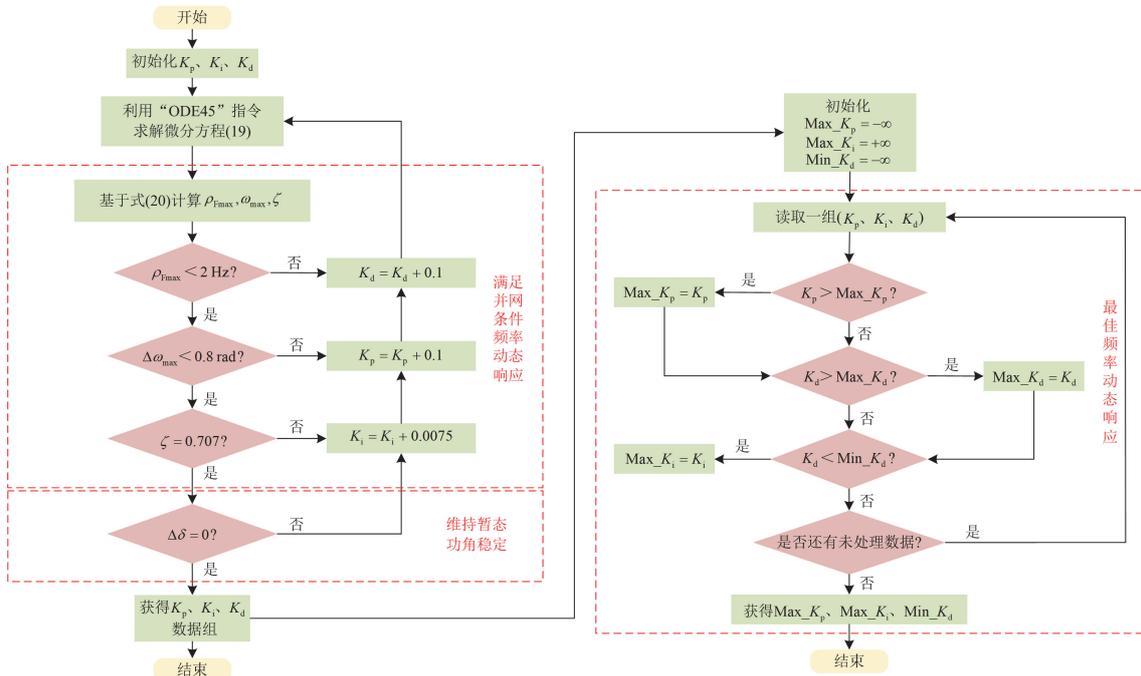


图 8 基于最佳频率动态效果的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 设计流程

Fig. 8 Flow chart of the design of K_p , K_i and K_d based on optimal frequency-domain dynamic performance

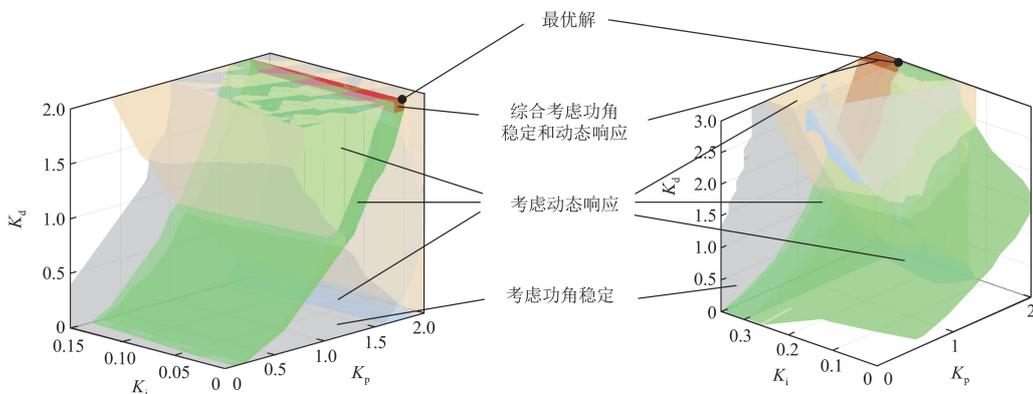


图 9 不同故障深度下改进 VSG 考虑最佳暂态性能的 K_p 、 K_i 和 K_d 的取值范围与最优解

Fig. 9 Values of K_p , K_i and K_d for improved VSG considering optimal transient performance and optimal solution under different fault depths

4 仿真验证

为了验证本文理论分析的正确性和控制策略的有效性, 分别对 I 型轻度故障和 II 型重度故障下 VSG 传统控制和所提控制的暂态性能进行仿真验证, 同时选取 $J-D$ 自适应控制^[14]作为典型对比方法进行仿真验证分析, 仿真结果如图 10 和图 11 所示。基于 MATLAB/Simulink 搭建如图 1 所示 VSG 并网系统仿真模型, 主要仿真参数如表 2 所示。

4.1 I型轻度故障下所提控制暂态性能

传统 VSG 控制、 $J-D$ 自适应控制^[14]和本文所提控制策略在 I 型轻度故障下的仿真结果如图 10 所示。图 10(a)中, 在传统控制下 VSG 的功角和频率都发散, 说明系统失去了功角稳定和频率稳定。图 10(b)相比于图 10(a), VSG 维持了一段时间的稳定,

频率响应参数 $\Delta\omega_{\max}$ 与 $\rho_{F\max}$ 得到一定的抑制, 但由于功率不平衡问题仍存在, 最后仍然发生振荡失稳。而在图 10(c)中, 本文所提控制策略使 VSG 在 I 型轻度故障下保持稳定的功率输出, 并且 $\Delta\omega_{\max}$ 与 $\rho_{F\max}$ 的数值明显低于图 10(b)中的数值。仿真结果表明, 本文所提自适应频率优化控制策略可以在 I 型轻度故障下维持 VSG 暂态稳定。

表 2 主要参数

Table 2 Main parameters

参数	数值	参数	数值
P_{ref}	30 kW	Q_{ref}	0
U_{ref}	311 V	U_g	311 V
ω_n	314 rad/s	L_g	5 mH
R_g	0	D_p	1800 N·m·s/rad
J	40 kg/m ²	K_q	0.004 V/kvar

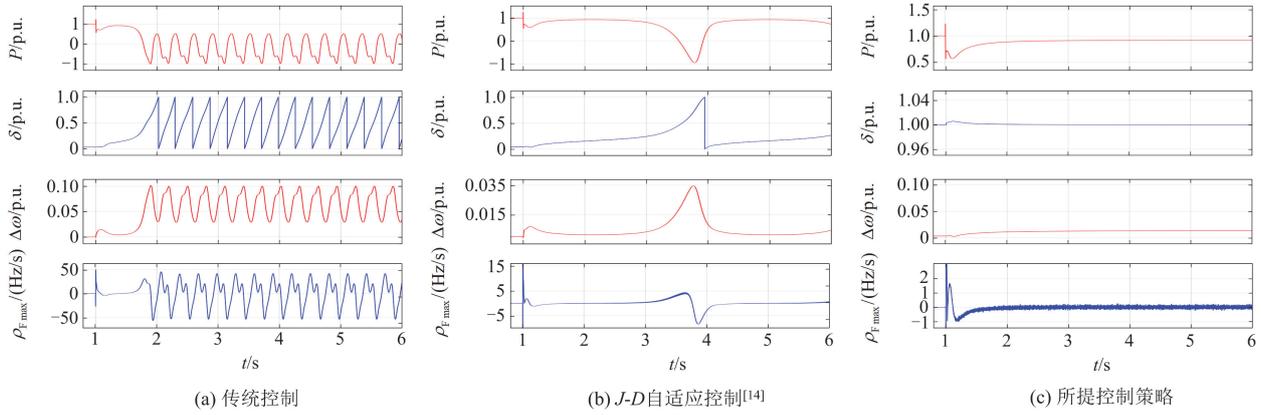


图 10 I 型轻度故障下 VSG 仿真结果($k=0.5$)

Fig. 10 VSG simulation results under type I fault depth ($k=0.5$)

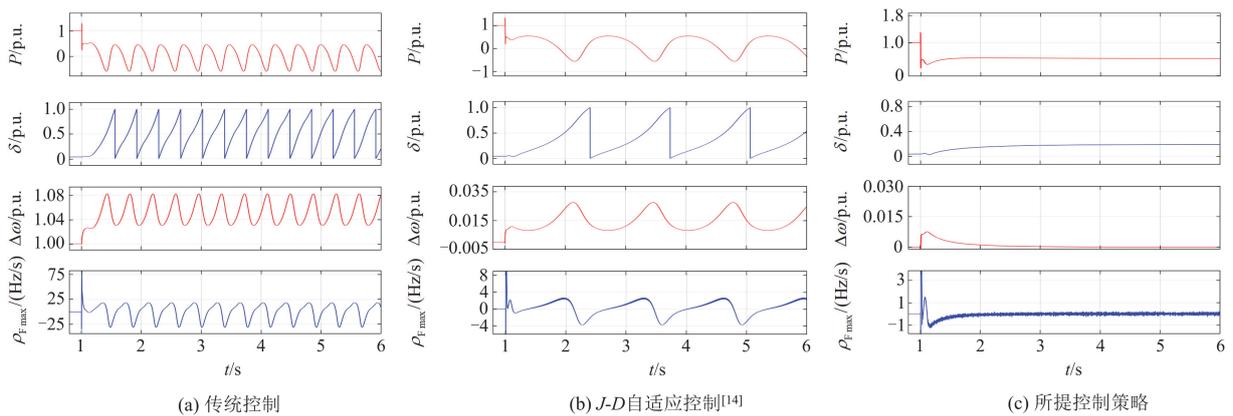


图 11 II 型重度故障下 VSG 仿真结果($k=0.3$)

Fig. 11 VSG simulation results under type II fault depth ($k=0.3$)

4.2 II 型重度故障下所提控制暂态性能

传统 VSG 控制、 $J-D$ 自适应控制^[14]和本文所提控制策略在 II 型重度故障下的仿真结果如图 11 所

示。在图 11(b)中, $J-D$ 自适应控制^[14]在一定程度上减少了 $\Delta\omega$ 与 ρ_F 的振荡幅值, 抑制了振荡频率, 即优化了 VSG 的暂态性能, 但仍然无法恢复稳定。与

此相比, 图 11(c)中 VSG 由于本文所提频率优化控制, 在 II 型重度故障下保持稳定功率输出, 并且 $\Delta\omega_{\max}$ 与 $\rho_{F\max}$ 的数值明显低于图 11(b)中数值。仿真结果表明, 本文所提自适应频率优化控制可以在 II 型重度故障下重塑 VSG 系统的稳定平衡点, 使 VSG 系统在故障时有功功率和频率恢复稳定输出。

5 实验验证

为验证理论分析的正确性和所提方法的有效性, 基于 RT-LAB 硬件在环平台搭建如图 1 所示电路模型, 实验参数如表 2 所示, 采样时间 $T_s = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$, 控制算法在 DSP28335 中实现, RT-LAB 实验平台如图 12 所示。I 型轻度故障和 II 型重度故

障下传统 VSG 控制与所提控制的暂态性能实验波形分别如图 13 和图 14 所示。

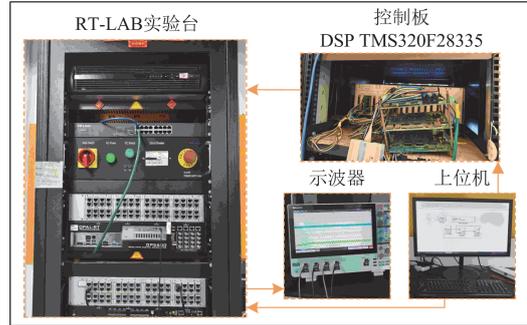


图 12 RT-LAB 实验平台

Fig. 12 RT-LAB experimental platform

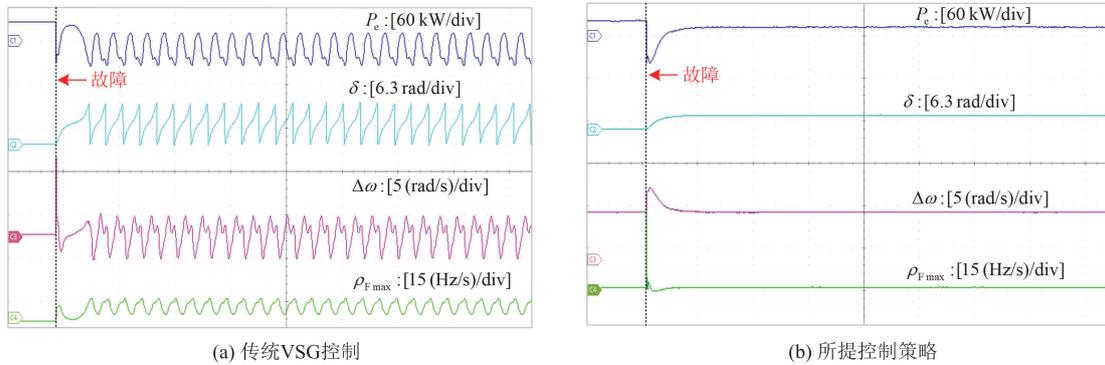


图 13 I 型轻度故障下 VSG 实验结果($k = 0.5$)

Fig. 13 VSG experimental results under type I fault depth ($k = 0.5$)

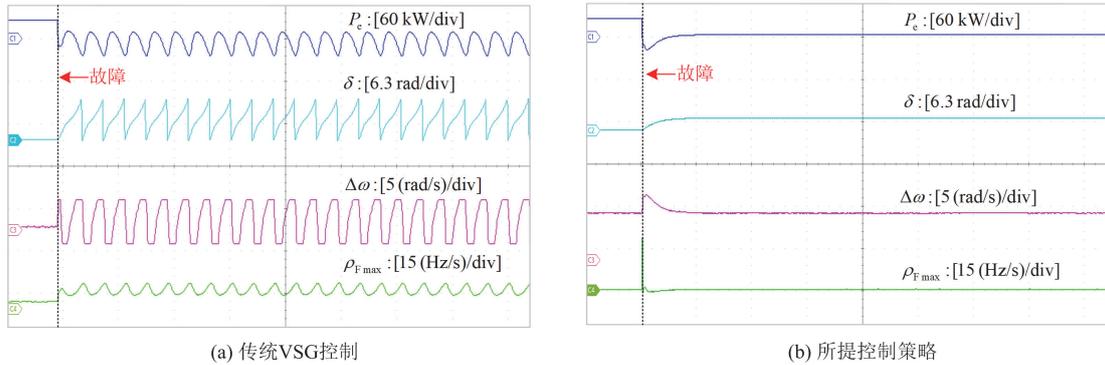


图 14 II 型重度故障下 VSG 实验结果($k = 0.3$)

Fig. 14 VSG experimental results under type II fault depth ($k = 0.3$)

从图 13 与图 14 可以看出, 故障发生时本文所提控制方法可以保证 VSG 的暂态功角稳定性, 并且满足频率响应需求, 验证了该自适应暂态稳定控制策略的正确性和可行性。

6 结论

故障下电网的暂态稳定性涉及两个严重的问

题, 即暂态功角失稳和暂态频率失稳。本文针对大扰动下 VSG 的功角稳定性和频率稳定性, 提出了一种基于角频率负反馈的自适应频率优化控制策略, 灵活调节 VSG 控制参数, 进而增强功角稳定性和频率稳定性。然后给出一种计及频率动态响应的控制参数设计方法, 并定量刻画参数可行域与最优解, 为大扰动故障下 VSG 控制参数的设计提供理论指

导, 并通过仿真和实验验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [2] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [3] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [4] ELWAKIL M M, EL ZOGHABY H M, SHARAF S M, et al. Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for Islanded microgrid stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-21.
- [5] FU Xikun, SUN Jiajun, HUANG Meng, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7832-7840.
- [6] 符杨, 陈禹瑾, 季亮, 等. 考虑功率解耦的构网型逆变器的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 1-13.
FU Yang, CHEN Yujin, JI Liang, et al. Low voltage ride-through control strategy of a grid-forming inverter considering power decoupling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 1-13.
- [7] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74.
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [8] 王自力, 陈燕东, 李雪萍, 等. 孤岛微电网多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略电力系统保护与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 12-23.
WANG Zili, CHEN Yandong, LI Xueping, et al. Coordinated control strategy for frequency deviation-free regulation of multiple VSGs in an island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 12-23.
- [9] LÜ Zhipeng, GONG Xiaotong, LIU Linxu, et al. Parameters analysis and operation area calculation of VSG applied to distribution network[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 9(6): 2214-2223.
- [10] 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.
- [11] 朱子民, 张锦芳, 常清, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑柔直系统的送端自适应 VSG 控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 211-221.
ZHU Zimin, ZHANG Jinfang, CHANG Qing, et al. Adaptive VSG control strategy of sending end for large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized support VSC-HVDC system[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 211-221.
- [12] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962, 4273.
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962, 4273.
- [13] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in Islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [14] GE Pingjuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Design-oriented analysis and transient stability enhancement control for a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2675-2684.
- [15] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [16] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [17] 涂春鸣, 杨万里, 肖凡, 等. 考虑故障限流的 VSG 暂

- 态功角稳定控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 55-62, 94.
- TU Chunming, YANG Wanli, XIAO Fan, et al. Transient power angle stability control method of VSG considering fault current limitation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 55-62, 94.
- [18] LUO Cong, CHEN Yandong, XU Yuancan, et al. Two-stage transient control for VSG considering fault current limitation and transient angle stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 7169-7179.
- [19] WANG Jilei, ZHANG Xing, LI Ming. Transient Stability Analysis and improvement of multiparalleled virtual synchronous generators grid-connected system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 4094-4105.
- [20] 沈超, 帅智康, 程慧婕. 虚拟同步机并联电流控制型变换器系统暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 115-123.
- SHEN Chao, SHUAI Zhikang, CHENG Huijie. Transient Synchronization stability analysis of system with paralleled virtual synchronous generators and current-controlled converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 115-123.
- [21] 马士聪, 郭剑波, 汪梦军, 等. 能量视角下电力系统暂态频率问题初探[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1373-1383.
- MA Shicong, GUO Jianbo, WANG Mengjun, et al. A preliminary exploration of transient frequency issues in the power system from an energy perspective[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1373-1383.
- [22] 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.
- [23] 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.
- MAO Meiqin, DING Yong, HU Jian, 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.
- [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] YU Jingrong, LU Xiawei, XIONG Sha, et al. Transient stability enhancement of virtual synchronous generators based on additional frequency control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(1): 1129-1139.
- [26] 付媛, 张保泽, 张祥宇, 等. 虚拟同步耦合下储能的频率支撑与功率振荡多目标协调控制[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 1-9, 23.
- FU Yuan, ZHANG Baoze, ZHANG Xiangyu, et al. Multi-objective coordinated control of frequency support and power oscillation for energy storage under virtual synchronous coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 1-9, 23.
- [27] WU Heng, WANG Xiongfei. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.
- [28] YUAN Hao, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3981-3991.
- [29] HARNEFORS L, WANG Xiongfei, YEPES A G, et al. Passivity-based stability assessment of grid-connected VSCs—an overview[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(1): 116-125.
- [30] 杨万里, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向频率稳定性提升的 VSG 暂态稳定性增强方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 52-66.
- YANG Wanli, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient stability enhancement method of VSG with frequency stability improvement[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 52-66.

收稿日期: 2025-01-11; 修回日期: 2025-05-09

作者简介:

张瀚宇(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为功率变换器稳定分析与控制; E-mail: hanyuzhang10@foxmail.com

盘宏斌(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源发电与并网技术; E-mail: pan_hongbin@xtu.edu.cn

陈燕东(1979—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电系统建模与控制、微电网技术、特种电源技术。E-mail: yandong_chen@hnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)