

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240379

应用多参数协同自适应方法的虚拟同步发电机控制策略

陈杰, 程静, 王维庆, 黄瓷

(可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 应用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术的光储系统在并网运行工况发生改变时, VSG输出功率和频率会发生较大波动。为了减缓功率-频率振荡, 提出一种多参数协同自适应控制策略, 该策略能有效抑制系统波动。首先根据 VSG 小信号模型, 推导出系统满足相角稳定裕度条件下虚拟惯量 J 和阻尼系数 D 的取值范围。其次考虑到有功下垂系数 K_f 会改变系统功率-频率特性的敏感程度, 设计了包含 J 、 D 、 K_f 的三参数协同自适应变化函数, 为实现阻尼系数在第二阶段缓慢减小和第四阶段进一步增大, 引入了频率差值积分项。然后, 为进一步验证此方法在系统受大扰动时的适用性, 在小信号分析的基础上进行 VSG 暂态稳定性分析。最后, 在 Matlab/Simulink 平台的仿真模型中针对不同工况进行验证。仿真结果表明, 无论在大扰动还是小扰动工况, 采用改进后的方法都能够很好地增强系统稳定性。

关键词: 虚拟同步发电机; 小信号模型; 虚拟惯量; 阻尼系数; 下垂系数; 自适应控制

Control strategy for a virtual synchronous generator using a multi-parameter cooperative adaptive method

CHEN Jie, CHENG Jing, WANG Weiqing, HUANG Ci

(Ministry of Education Engineering Research Centre for Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control (Xinjiang University), Urumqi 830017, China)

Abstract: The output power and frequency of the optical storage system using virtual synchronous generator (VSG) technology will fluctuate greatly when the operating condition of the system is changed. In order to slow down power-frequency oscillation, a multi-parameter cooperative adaptive control strategy is proposed, which can effectively suppress system fluctuation. First, based on VSG small signal model, the value range of virtual inertia J and damping coefficient D under the condition that the system meets the phase angle stability margin is derived. Secondly, considering that the active power sag coefficient K_f will change the sensitivity of the system's power-frequency characteristics, a three-parameter collaborative adaptive change function including J , D and K_f is designed. In order to realize D slowly decreasing in the second stage and further increasing in the fourth stage, the integral term of frequency difference is introduced. To further verify the applicability of this method when the system is subjected to large perturbations, VSG transient stability analysis is performed on the basis of small-signal analysis. Finally, it is verified in the simulation model of Matlab/Simulink platform for different working conditions. The simulation results show that the system stability can be well enhanced with the improved method in both large and small disturbance conditions.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1506900).

Key words: virtual synchronous generator; small signal model; virtual inertia; damping coefficient; sag coefficient; adaptive control

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 可再生能源在电力

系统的能源供给中扮演着越来越重要的角色^[1-3]。使用新型分布式电源和微电网技术, 可以缓解可再生能源比例不断升高所带来的新能源难以友好消纳的现象^[4]。随着新能源发电的渗透率不断升高^[5], 尤其是有着低惯量特点的风光发电大量接入^[6], 传统同步发电机难以为工况突变提供有效的惯性支撑^[7],

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1506900); 新疆维吾尔自治区重大专项资助(2022A01001-4)

这会造成电力系统频率和电压发生较大波动, 拥有虚拟同步发电机技术的微电网能够有效缓解以上问题。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)算法使新能源逆变器不仅具有下垂特性^[8], 还具有和同步发电机一样的惯量和阻尼特性, 既能增加新能源的消纳能力, 又让这类逆变器能够为电网提供一定的惯性支撑。

VSG 自适应控制策略主要是对虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 以及有功下垂系数 K_f 进行整定^[9-11]。VSG 因参数可调特性而具有优秀抗扰动能力, 为充分利用以上优点, 其自适应参数调节的设计显得十分重要^[12]。文献[13]提出了一种基于模糊的虚拟同步发电机控制策略, 以加快微电网中可再生能源发电的惯性响应。文献[14]提出一种参数平滑连续调节的方法来抑制系统频率和功率的波动。文献[15]根据转子运动的特点, 分析了转动惯量与一阶惯性环节时间常数之间的关系设计自适应控制算法。文献[16]通过智能学习算法以及下垂关系进行自适应控制, 能够避免微电网频率偏移越限。文献[17]通过引入双曲正弦函数来优化惯量, 并采用等面积定则进行分析, 进行了小扰动和暂态稳定性验证。文献[18]通过分析参数变化对系统响应的影响, 强调了保持最佳阻尼比对提高 VSG 动态性能的重要性。文献[19]通过引入虚拟惯性来增强逆变器的鲁棒性和稳定性, 使用自适应算法能够在系统运行条件发生变化时提高功率和频率的稳定性。文献[20-22]根据系统运行偏差动态调整系统的虚拟惯性, 以增强微电网系统的性能。文献[23]采用了分段函数的思想对 J 、 D 进行了设计, 这种自适应算法能够对不同工况下的扰动进行有效抑制, 但是在第二阶段由于 D 没有持续增大导致角频率 ω 下降速度不够快。文献[24-26]中的自适应算法只考虑了频率偏差对阻尼系数、虚拟惯量的影响, 其自适应函数在频率变化量增加时增大虚拟惯量, 在角频率偏差变大时增大阻尼系数。以上方法仅针对虚拟惯量和阻尼系数进行改进, 并没有考虑有功下垂系数对系统的影响, 并且没有针对第二阶段 D 应持续增大这一情况进行分析, 以至于 VSG 在面对系统扰动时不能充分发挥其优势。除了要考虑 VSG 小扰动工况外, 还应该考虑 VSG 面对大扰动时的系统稳定性。文献[27]通过分析线性系统的规律, 推导出非线性 VSG 的大扰动暂态稳定具有相似规律, 但是仅限于电压跌落不深的情形。文献[28]深入分析了 VSG 暂态稳定的两类情形, 并引入频率差值前馈通道, 提升大扰动时的系统稳定性, 但是忽略了应对小干扰时的快速响应。

针对以上的研究和分析, 为了使 VSG 能够更好地抑制波动, 进一步降低功率和频率的超调量以

及暂态调节时间, 本文提出一种 VSG 多参数协同自适应控制策略, 根据逆变器和电网的角速度差值 $\Delta\omega$ 以及角加速度 $d\omega/dt$ 的实时值对 J 、 D 、 K_f 进行了联合设计。首先, 根据传统同步发电机的转子运动方程和电压励磁方程建立 VSG 的数学模型; 然后结合 VSG 并网模式的等效电路, 推导出包含 VSG 变量的小信号模型, 根据小信号模型分析各变量对系统稳定性的影响; 其次根据功角-频率特性曲线分析出虚拟惯量 J 和阻尼系数 D 的理论变化趋势, 并根据系统稳定裕度计算出 J 、 D 的取值范围, 考虑到有功下垂系数 K_f 会改变系统功率-频率特性的敏感性, 设计了包含 J 、 D 、 K_f 的三参数协同自适应变化函数, 为了不让阻尼系数在第二阶段减小太快和第四阶段进一步增大, 引入了频率差值积分项。为了不失一般性, 在小信号分析的基础上进行了暂态分析, 对所提的 J 、 D 取值范围进一步限定; 最后, 针对不同工况在 Matlab/Simulink 平台的仿真模型中进行验证, 结果表明所提方法能够有效抑制各种工况下的系统波动。

1 VSG 结构及原理

1.1 VSG 逆变器并网系统结构

VSG 并网拓扑结构如图 1 所示, 其中光伏发电采用最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制, 储能系统应与光伏发电的波动及电网功率指令的变动进行协调, 以保持系统功率平衡和直流电压稳定。逆变器采用 VSG 控制算法输出指令电压, 指令电压信号通过电压电流双闭环控制输出, 用于脉冲信号的生成。系统脉冲触发信号采用空间矢量脉冲宽度调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)策略, 其具有快速响应、稳定性高、输出电压谐波低等优点。

1.2 VSG 控制原理

VSG 控制框图如图 2 所示。图中: P_e 、 P_{ref} 分别为 VSG 实际输出功率和有功参考值; ω_0 、 ω 分别为额定角频率和 VSG 输出的实际角频率; K_f 、 K_u 分别为有功下垂系数和无功下垂系数; Q_e 、 Q_{ref} 分别为 VSG 输出无功功率和无功参考值; V_g 、 V_0 分别为电网电压和 VSG 输出电压值; K_{Qi} 为无功环积分系数; T_m 为机械转矩。通过 VSG 有功控制环和无功控制环输出的相位和电动势, 合成电压指令信号 V_d 和 V_q , 用于下一级的电压电流双闭环控制。

VSG 的虚拟调速控制主要以同步发电机的转子运动方程为基础, 由同步发电机的机械转矩与有功频率变化的关系可得式(1)。

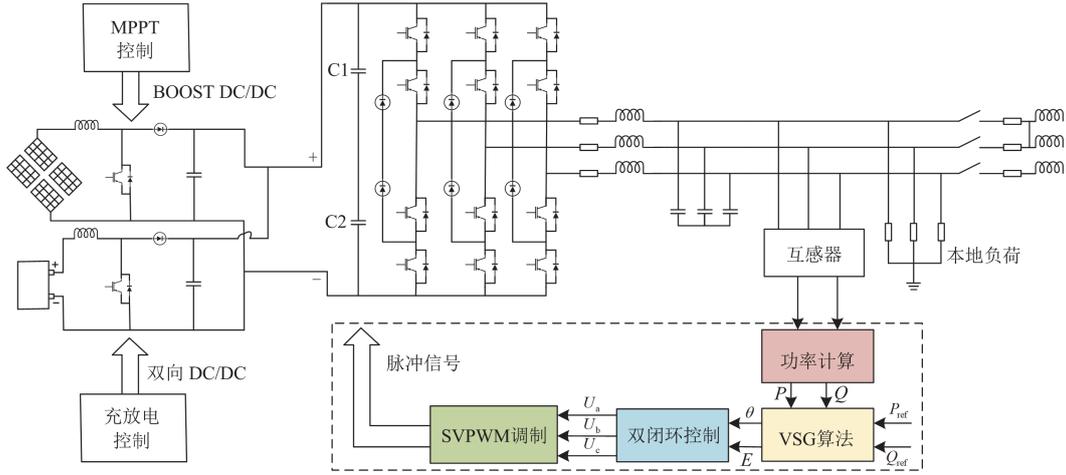


图 1 VSG 并网拓扑结构

Fig. 1 VSG grid-connected topology

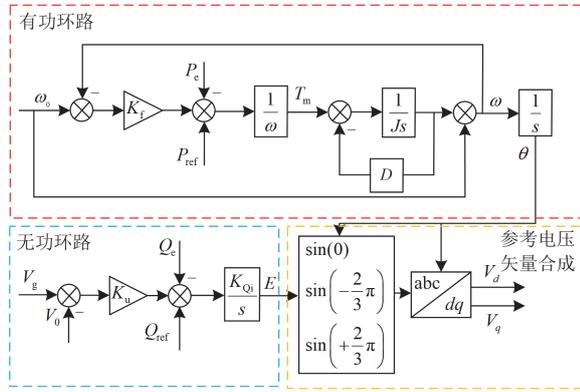


图 2 VSG 有功-无功控制框图

Fig. 2 VSG active-reactive power control block diagram

$$T_m - T_e = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + D(\omega_0 - \omega) \quad (1)$$

式中, T_e 为电磁转矩。由式(1)可知, 机械转矩减去电磁转矩用于提供转子加速和减速。

由式(1)的机械转矩方程可以得到关于 VSG 的转子运动方程, 如式(2)所示。

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式中, P_m 为机械功率。由式(2)可知系统功率-频率之间的调节关系。

根据图 2 中的有功下垂控制可得

$$P_m = P_{ref} + K_f(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

由式(3)可知, 系统对频率偏差的敏感程度由有功下垂系数 K_f 直接决定。

联立式(2)、式(3), 再经过拉氏变换可得

$$\omega = \frac{1}{Js} \cdot \frac{P_{ref} + K_f(\omega - \omega_0) - P_e}{\omega} - \frac{D(\omega_0 - \omega)}{Js} \quad (4)$$

2 J、D、 K_f 对 VSG 输出特性的影响

2.1 系统小信号模型建立

图 3 为 VSG 并网模式的等效电路图。图中: Z_0 为 VSG 输出阻抗; Z_g 为电网阻抗; Z 为等效电路总阻抗; E 为 VSG 输出电压; V_g 为电网电压; δ 为两电压的相位差。

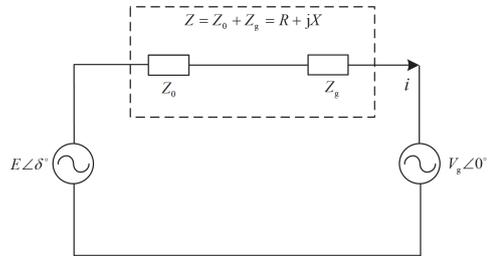


图 3 VSG 微电网等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of VSG microgrid

根据图 3 可得 VSG 输出功率 S_e 的表达式为

$$S_e = \frac{E^2 - EV_g(\cos \delta + j \sin \delta)}{r - jX} = P_e + jQ_e \quad (5)$$

其中

$$\delta = \int (\omega - \omega_g) dt \quad (6)$$

式中: ω_g 为电网角速度; X 为虚拟电感; r 为线路电阻。逆变输出电压与电网电压之间的阻抗通常近似于纯感性, 即当 $X \gg r$ 时, 式(5)可简化为

$$S_e \approx \frac{EV_g}{X} \sin \delta + j \frac{E}{X} (E - V_g \cos \delta) \quad (7)$$

由式(7)可得有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_c = \frac{EV_g}{X} \sin \delta \\ Q_c = \frac{E}{X} (E - V_g \cos \delta) \end{cases} \quad (8)$$

为了体现各变量对 VSG 输出量和系统的影响以及输出有功无功之间的耦合关系, 需要对 VSG 作小信号建模分析。式(8)是经过半个工频周期平均化后的结果, 基于此公式的模型只能反映系统两倍工频以内的特性, 因此下文推导的模型称为 VSG 工频小信号模型。综上, 结合有功-无功控制环路和微电网并网等效模型可得 VSG 包含各变量的表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} + D(\omega_0 - \omega) - P_c = J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \\ \delta = \int (\omega - \omega_g) dt \\ Q_{\text{ref}} + K_u(V_g - V_0) - Q_c = K_{Qi} \frac{dE}{dt} \\ P_c = \frac{EV_g}{X} \sin \delta \\ Q_c = \frac{E}{X} (E - V_g \cos \delta) \end{cases} \quad (9)$$

将控制环路中的变量改写成直流量加低频扰动量的形式, 改写后的变量形式为

$$\begin{cases} \omega = \omega_n + \hat{\omega} \\ \delta = \delta_n + \hat{\delta} \\ P_c = P_{cn} + \hat{P}_c \\ Q_c = Q_{cn} + \hat{Q}_c \\ E = E_n + \hat{E} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_n 、 δ_n 、 P_{cn} 、 Q_{cn} 、 E_n 为 VSG 各变量对应的直流量; \hat{P}_c 、 $\hat{\delta}$ 、 \hat{Q}_c 、 $\hat{\omega}$ 、 \hat{E} 为各变量对应的低频小扰动交流量, 即小信号。

联立式(9)、式(10), 可得 VSG 输出功率、角速度和电压的大信号模型。将交流量与直流量进行分离得到两个式子, 其中只含有交流量的式子即为 VSG 线性化后的小信号模型, 经过拉氏变换最终表达式为式(11)。

根据式(11)可以建立 VSG 小信号控制框图, 其线性化模型如图 4 所示。由图 4 可知, 在所建立的小信号模型中, 存在有功与无功之间的耦合, 但当 δ_n 足够小时可以忽略耦合, 从而得到近似的有功输出与有功指令的闭环传递函数 $\varphi_p(s)$ 。

$$\begin{cases} \hat{\omega}(s) = \frac{\hat{P}_{\text{ref}} - P_c(s)}{J\omega_n s + D} \\ \hat{\delta}(s) = \frac{\hat{\omega}(s)}{s} \\ \hat{E}(s) = \frac{\hat{Q}_{\text{ref}}(s) - \hat{Q}_c(s)}{\sqrt{2}(K_{Qi}s + K_u)} \\ \hat{P}_c(s) = \frac{E_n V_g}{X} \hat{\delta}(s) + \frac{V_g}{X} \delta_n \hat{E}(s) \\ \hat{Q}_c(s) = \frac{2E_n - V_g}{X} \hat{E}(s) + \frac{V_g E_n}{X} \delta_n \hat{\delta}(s) \end{cases} \quad (11)$$

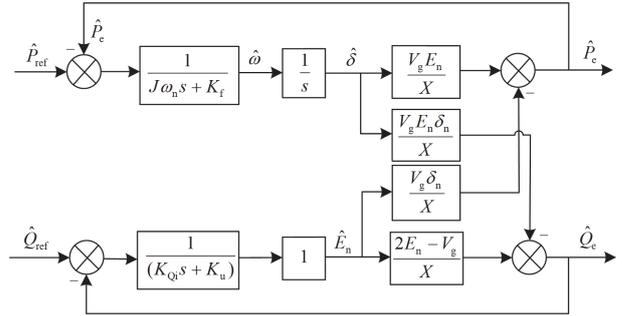


图 4 VSG 小信号控制框图

Fig. 4 VSG small signal control block diagram

$$\varphi_p(s) = \frac{\frac{V_g E_n}{J\omega_n X}}{s^2 + \frac{D}{J\omega_n} s + \frac{V_g E_n}{J\omega_n X}} \quad (12)$$

由式(12)可知, 有功环的闭环传递函数是一个典型的二阶振荡环节, 因此有功环的自然振荡角频率 ω_{ns} 和阻尼比 ζ 分别为

$$\begin{cases} \omega_{ns} = \sqrt{\frac{V_g E_n}{JX E_n \omega_n}} \\ \zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{X}{JV_g E_n \omega_n}} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 阻尼系数 D 只影响阻尼比, 而虚拟惯量 J 既影响阻尼比也影响自然振荡角频率, 因此, 可知 J 对系统影响更大。

2.2 稳定性分析

分析 VSG 小信号模型的稳定性有多种方法, 为了能够直观地观察全局 J 、 D 参数对系统稳定性的影响, 本文采用根轨迹的方法对其进行稳定性分析。根据式(12)可得传递函数特征方程 $F(s)$ 为

$$F(s) = s^2 + \frac{D}{J\omega_n} s + \frac{V_g E_n}{J\omega_n X} \quad (14)$$

根据式(14)画出全局虚拟转动惯量 J 和虚拟阻

尼 D 的根轨迹图, 如图 5 所示。

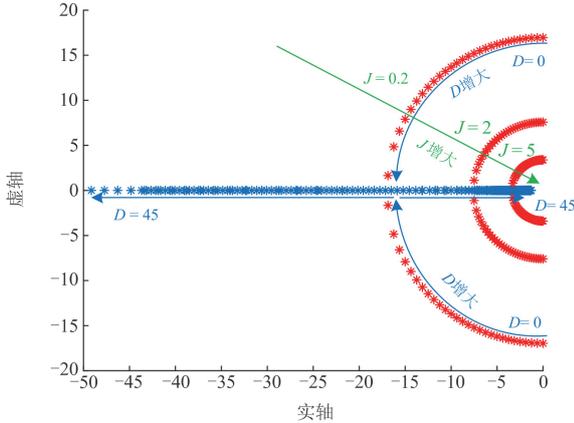


图 5 全局 J 、 D 的根轨迹图

Fig. 5 Global J and D root trajectories

从根轨迹图可以看出: 随着 J 变大, 其根轨迹逐渐向原点收拢; 在 J 相同的情况下, 随着 D 变大, 根的轨迹逐渐向左侧分离点靠近, 最后分离为两个相异的实根。这也对应着系统由欠阻尼到临界阻尼, 最后变成过阻尼的过程, 这意味着在很大范围内 J 、 D 的取值都能使系统稳定。但是为了让系统留有一定的稳定裕度, 还需要进一步限制 J 、 D 的取值, 这将在下一步进行分析。从根轨迹还可以看出, D 主要影响系统的衰减速度; 而 J 不仅影响衰减速度, 还影响系统振动频率。因此, J 的改变对系统的响应更为明显。

此外, 有功下垂系数 K_f 为

$$K_f = \frac{\Delta P}{\Delta \omega} \quad (15)$$

式中, ΔP 和 $\Delta \omega$ 分别为功率变化量和频率变化量。可以看出, 有功下垂系数直接影响系统对频率变化的敏感程度, 这也会间接影响系统的响应速度。

综上, 针对系统主要参数有以下总结: 虚拟惯量 J 不仅影响超调和调节时间, 还会影响系统固有振动频率, 其对系统影响程度最大; 虚拟阻尼 D 会影响系统的阻尼, 可以配合 J 的变化使系统能更好地抵抗扰动; 有功下垂系数 K_f 会影响系统对频率变化的敏感程度, 可影响系统响应速度。

2.3 J 、 D 、 K_f 参数整定

当系统发生扰动时, 其功角-频率特性曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 以 VSG 功率指令发生阶跃变化时功角和频率的波动情况为例, 因为其变化规律是以四个阶段为一个周期, 因此只需对前四个阶段进行分析。

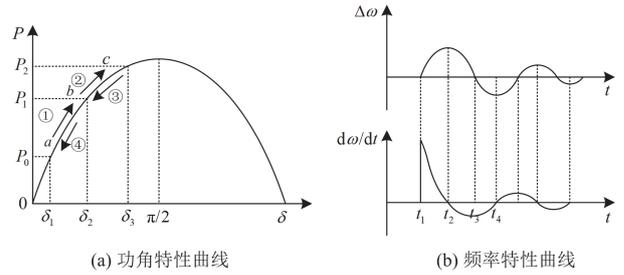


图 6 功角、频率特性曲线图

Fig. 6 Power angle-frequency characteristic curve

阶段一: 功率指令大于实际输出功率。此时 VSG 转矩过剩, 转速将上升, 达到平衡点 b 时由于惯性作用功率将继续上升, 转子速度达到最大。因此在此阶段可增大 J , 使其有更大惯性阻止转子加速; 此时虚拟阻尼 D 也适当增大, 以增加摩擦力限制转子加速; 对于整个扰动过程, 有功下垂系数 K_f 应增加, 以增大频率偏离对系统的影响。

阶段二: 越过平衡点 b 后, 转子速度降低, 转子转速回到额定转速。此时应减小 J , 降低惯性使转速能快速降低; D 继续增大, 用更大的摩擦力使转速降低。

阶段三: 由于惯性作用, 转子转速继续降低。此时应增大 J , 使转子减速变慢, 从而有更小的速度偏差; 应减小 D , 降低摩擦, 达到缓慢减速的目的。

阶段四: 转子转速降到最低后, 开始加速回到额定值。此时减小 J 以减小惯性, 使转速快速回到额定值; D 也应该减小, 从而摩擦力减小, 转子角速度增加更快。

通过以上分析, 可以根据 $\Delta \omega$ 、 $d\omega/dt$ 的变化判定 J 、 D 和 K_f 的变化情况, 如表 1 所示。

表 1 J 、 D 、 K_f 变化原理

Table 1 Change principle of J , D and K_f

阶段	$\Delta \omega$	$d\omega/dt$	J	D	K_f
①	>0	>0	增大	增大	增大
②	>0	<0	减小	进一步增大	增大
③	<0	<0	增大	减小	增大
④	<0	>0	减小	进一步减小	增大

根据扰动分析, 设计如下自适应 K_f 和 J 、 D 的变化函数。

$$K_f = \begin{cases} K_{f0} \\ K_{f0} + K_{kf1} \Delta \omega, \Delta \omega > M_{kf} \\ K_{f0} - K_{kf2} \Delta \omega, \Delta \omega < M_{kf} \end{cases} \quad (16)$$

$$J = \begin{cases} J_0 \\ J_0 + K_{J1}|\Delta\omega|, \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} \geq 0 \text{ 且 } |\Delta\omega| > M_J \\ J_0 - K_{J2}|\Delta\omega|, \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} < 0 \text{ 且 } |\Delta\omega| > M_J \end{cases} \quad (17)$$

$$D = \begin{cases} D_0 \\ D_0 + K_{D1}(\Delta\omega + \int \Delta\omega dt), \Delta\omega \geq 0 \text{ 且 } |\Delta\omega| > M_D \\ D_0 + K_{D2} \int \Delta\omega dt, \Delta\omega < 0 \text{ 且 } |\Delta\omega| > M_D \end{cases} \quad (18)$$

式中: J_0 、 D_0 、 K_{J0} 分别为虚拟惯量、阻尼系数和有功下垂系数的初始值; K_J 、 K_D 、 K_{kf} 分别为虚拟惯量、阻尼系数和有功下垂系数变化函数的调节系数; M_J 、 M_D 、 M_{kf} 分别为虚拟惯量、阻尼系数和有功下垂系数变化函数的启用阈值。

由式(17)可知, 由于 J 对系统影响较大, 因此 J 应严格按照理论分析变化。通过表 1 可知, 理论上在第二阶段 D 应当持续增大, 目的是让 ω 快速下降, 但是由于输出功率迟迟不能达到指令值, 第二阶段调节过程会变得很长。通过式(18)可知, 当 $\Delta\omega \geq 0$ 且 $|\Delta\omega| > M_D$ 时引入积分项, 既能让输出功率快速达到指令值, 又缓解了由 $\Delta\omega$ 减小造成的 D 快速减小的问题。当 $\Delta\omega < 0$ 且 $|\Delta\omega| > M_D$ 时 D 持续增大, 虽然在变化前期 D 增大的速度不够快, 但是后期频率波动抑制效果更好。由式(16)可知, 为了增强系统对系统频率变化的敏感性, K_f 随频率偏离程度而变化。

J 、 D 的取值对系统的稳定有直接影响, 为了保证系统在运行过程中有足够的稳定裕度, 需对其取值范围进行分析。由图 4 系统小信号模型可得, 其开环传递函数 $G_p(s)$ 为

$$G_p(s) = \frac{E_n V_g}{X} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(J\omega_n s + D)} \quad (19)$$

令传递函数的模值为 1, 可得

$$G_p(s) = \frac{1}{\omega_c} \cdot \frac{\frac{E_n V_g}{X J \omega_n}}{\sqrt{\omega_c^2 + \left(\frac{D}{J \omega_n}\right)^2}} = 1 \quad (20)$$

将截止频率 ω_c 代入相角裕度计算公式, 即可计算出此时的相角裕度。

$$\gamma = 180^\circ + \angle G_p(j\omega_c) \quad (21)$$

在实际工程中为了保持系统有一定的稳定裕度, 其相角裕度应该要大于 30° 。因此, 根据式(19)一式

(21)可得出在不同 J 、 D 取值下的相角裕度, 如图 7 所示。

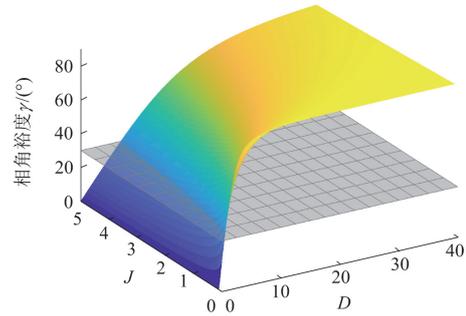


图 7 不同 J 、 D 取值下的相角裕度

Fig. 7 Phase angle margin under different J and D values

由图 7 可知, J 和 D 的取值不应太小, 否则系统没有足够的能力来抵抗外界扰动; 同时取值不应太大, 否则系统虽然拥有足够的相角裕度, 但是系统响应会减慢, 在后面的仿真结果中会进一步分析。结合式(17)一式(21)可知, J 取值最好维持在 $0.1 \sim 8$ 之间, D 的取值最好维持在 $3 \sim 35$ 之间, 在不同工况下其取值范围允许存在细微变化。有功下垂系数的取值范围会受到电网标准的限制, 根据我国的电网标准 GB/T15945, 结合有功下垂系数表达式(15), 其取值范围为 $200 \sim 700$ 。综合以上分析, 各参数的值如表 2 所示。

表 2 J 、 D 、 K_f 的取值

Table 2 Parameter values of J , D and K_f change function

参数	数值	参数	数值
J_0	0.95	M_J	0.01
D_0	18	M_D	0.05
K_{r0}	200	M_{kf}	0.005
K_{J1}	8	K_{J2}	1
K_{D1}	30	K_{D2}	40
K_{kf1}	500	K_{kf2}	700

2.4 VSG 暂态分析

上文通过分析小信号模型以及小扰动情形的系统稳定裕度得到了参数的选取范围, 并未对大扰动工况的系统稳定性进行分析。由于 VSG 暂态稳定性与 J 、 D 参数的变化高度相关, 并且为了保证所提方法在大扰动情形下同样适用, 对所提方法的暂态稳定分析是非常有必要的。

根据式(8)绘制 VSG 面对电网不同故障深度的有功传输功角曲线如图 8 所示。其中, δ_0 、 δ_c 和 δ_m 分别是故障前静态工作点功角、故障后稳定平衡点 (stable equilibrium point, SEP) 功角以及故障后不稳定平衡点 (unstable equilibrium point, UEP) 功角。随

着跌落实际电压与电网额定电压之比 k 的不断变小, 电网故障加深, 故障可分为有平衡点的一类故障和无平衡点的二类故障。由于要考虑在系统达到新平衡时故障仍未被切除的极端情况, 因此不再分析二类故障。要使系统具有一定的抵抗扰动能力, 功率指令必须低于 VSG 最大功率, 如若不然, VSG 将没有减速区间, 在面对极小的扰动时也会发散。为了具有一般性, 暂不考虑电力系统故障后的重合闸情况, 以及电压跌落过大造成系统不因 J 、 D 数变化而直接失稳的情形, 以便于分析 J 、 D 参数在大扰动情形下对系统稳定性的影响。

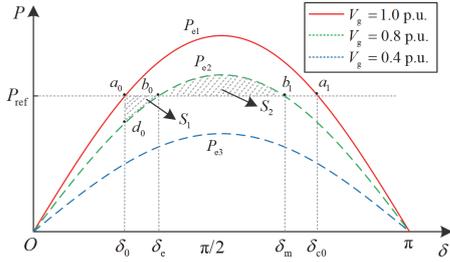


图 8 有功传输功率角曲线

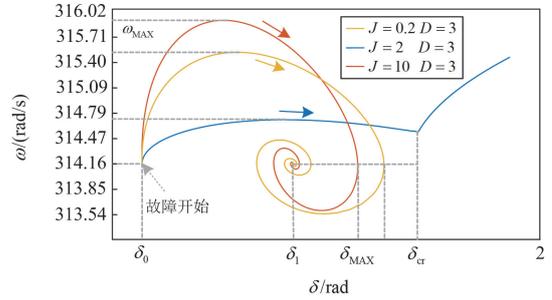
Fig. 8 Active power transmission power angle curve

以电压跌落 20% 为例, VSG 功率输出曲线由 1.0 p.u. 切换至 0.8 p.u., 此时 P_{ref} 大于 P_{e2} , 类似同步发电机的原动机转矩过剩, 转子将加速, 阴影区域 S_1 即为加速区域。随着 δ 增大, P_{e2} 越过稳定平衡点 b_0 , P_{e2} 大于 P_{ref} , 此时转矩不足, 转子减速, 阴影区域 S_2 即为减速区域。当减速区域面积未能抵消加速区域面积时, 系统将跨过不稳定平衡点 b_1 进入加速区域, 由于此后 P_{ref} 一直大于 P_{e2} , 转子将一直加速, 最终系统失稳。要使系统不发生失稳, 系统加速能量必须小于减速能量, 因此可以采用等面积法则计算 J 、 D 参数对加速减速区域面积的影响进而对 J 、 D 取值进一步限定, 使系统在面对大扰动时仍然能够维持稳定, 帮助系统穿越故障区间。

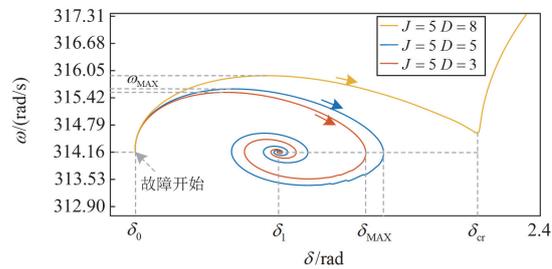
定性分析: 为了便于观察 J 、 D 对功角和角频率的影响趋势, 绘制如图 9 所示的相平面图, 其中: δ_{MAX} 为最大功角; ω_{MAX} 为最大角频率。

由图 9 可知, 当 J 取值不变时: D 的增大对频率和功角的调节都有积极作用, 更大的 D 使系统面对大扰动时具有更强的稳定性, 但是从小信号分析可知 D 取值过大, 其调节时间也会随之增加。当 D 不变时, 随着 J 的增大, ω_{MAX} 逐渐减小, 这和小扰动分析是相对应的。但是由于 J 的增大, δ_{MAX} 也逐渐变大, 当 J 值取得过大而使 δ_{MAX} 越过 UEP 无法恢复至新平衡点时, 会导致系统失稳。虽然 J 对频

率调节有积极作用, 但是其取值过大会使系统有失稳的风险, 这和小扰动情形是相悖的, 因此在大扰动情形下对参数取值的再分析是有必要的。



(a) D 不变, J 变化



(b) J 不变, D 变化

图 9 VSG 功角-频率相平面图

Fig. 9 VSG power angle-frequency phase plot

定量计算: 为了便于计算, 运用等面积原理, 根据 VSG 有功输出等式(8)和图 8 可知, 为使系统稳定, 加速面积 S_1 与减速面积 S_2 应满足不等式(22)。

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_{ref} - \sin \delta \frac{EV_g}{X} d\delta < \int_{\delta_c}^{\delta_m} \sin \delta \frac{EV_g}{X} - P_{ref} d\delta \quad (22)$$

将式(2)、式(6)代入式(22)可得到 J 、 D 关于加、减速面积的积分不等式, 如式(23)所示。

$$\begin{cases} \delta = \int (\omega - \omega_g) dt \\ \int_{\delta_0}^{\delta_c} J \omega_0 \cdot \dot{\omega} - D \omega_0 (\omega - \omega_0) d\delta < \\ \int_{\delta_c}^{\delta_m} D \omega_0 (\omega - \omega_0) - J \omega_0 \dot{\omega} d\delta \end{cases} \quad (23)$$

在 D 确定的情况下可以得到系统稳定时 J 的最大值。通过上述分析可以绘制系统受大扰动时系统稳定情况与 J 、 D 取值分布, 如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 当 D 取值较小时, J 的取值稍微过大就会使系统发散, 这和小信号分析出的 J 、 D 增大有利于系统稳定的结论相悖。出现这种差别的主要原因是小信号是基于 VSG 本身稳定性分析得到的, 而大扰动分析是 VSG 面对扰动环境的稳定性分析。因此为保证 VSG 面对大扰动能保持稳定运行且不失调节快速性, 本文将 D 的取值进一步

限定为 5~35。不管是小扰动还是大扰动, J 的取值不仅关乎稳定性也关乎调节的快速性, 本文暂不对 J 值做进一步的限定。面对大扰动时, 有功下垂系数 K_f 不会影响电压跌落时的稳定性, 只会影响系统有功输出, 对 K_f 的取值也不进行缩限。

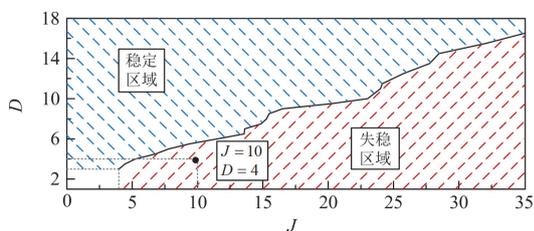


图 10 受大扰动时系统稳定情况与 J 、 D 取值分布

Fig. 10 Distribution of J and D values of system stability under large disturbance

3 仿真分析

本文在 Matlab/Simulink 中搭建了基于虚拟同步发电机技术的光储逆变器系统, 系统结构如图 1 所示, VSG 系统参数如表 3 所示。本文所采用的三参数自适应算法, 考虑了有功下垂系数的作用, 在频率发生波动时, 系统敏感性增加, 有助于增加系统响应速度。在功率指令切换、本地负荷投切和电压跌落这 3 种主要工况下, 验证了本方法的可行性、有效性。

表 3 VSG 系统参数

Table 3 VSG system parameters

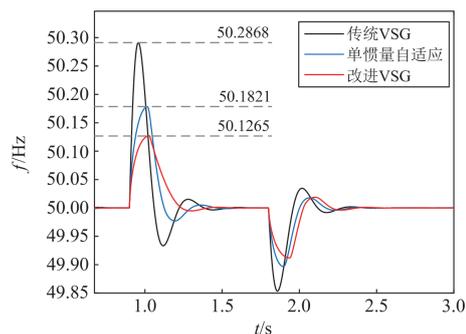
参数	值	参数	值
额定功率/kVA	100	开关频率/kHz	10
光伏有功容量/kW	20	直流母线电压/V	800
额定线电压/V	380	滤波电容/ μ F	20
储能有功容量/Ah	80	滤波电感/mH	3.2

3.1 有功指令切换

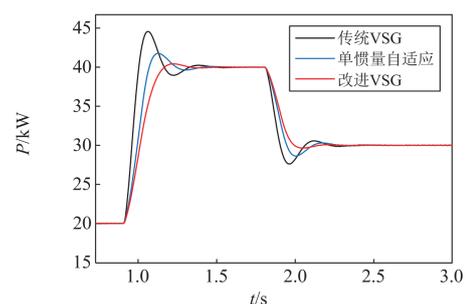
验证有功指令切换对 VSG 的影响时, 将 VSG 的有功指令变化情况设置为: 在 0.9 s 时由 20 kW 突变为 40 kW, 在 1.8 s 时又切换为 30 kW。

由图 11 可知, 当系统功率指令发生改变时, 采用本文的 J 、 D 、 K_f 联合自适应算法后, 输出频率超调量从 0.2868 Hz 降低到 0.1256 Hz, 相较于传统 VSG 超调量下降了 55.98%; 对超调量为 0.1821 Hz 的传统自适应 VSG 来说, 频率波动也有明显改善, 尤其是在第二阶段, 由于引入频率差值积分项, 使得 D 下降速度减缓, 系统频率能够更快回到额定值。

本文方法相较于前两种传统方法明显缩短系统调节时间, 在第三阶段到第四阶段就能够满足进



(a) 频率变化



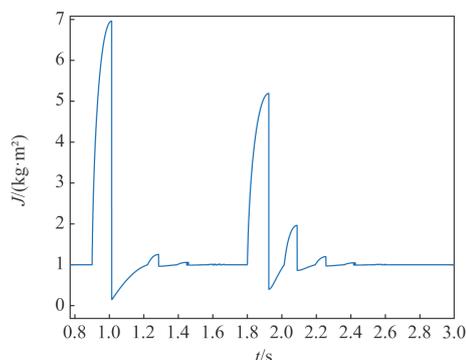
(b) 功率变化

图 11 有功指令切换下的有功-频率变化

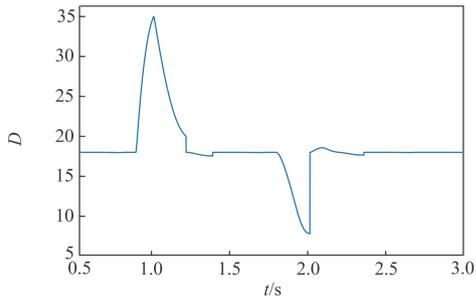
Fig. 11 Change of active power-frequency under active power instruction switching

入稳态的要求。在功率波动方面, 相较于传统 VSG, 本方法有更加明显的功率波动抑制作用, 使 VSG 的有功输出能够更快速地稳定在指令值, 功率提升也更为平缓。在含有储能系统的逆变器中, 激进的功率提升意味着对储能系统有着更为严格的要求, 在实际情况中, 储能可能达不到如此激进的功率输出变化。因此, 不管是频率波动抑制还是功率输出的平缓性, 所提出的 J 、 D 、 K_f 联合自适应相较于传统 VSG 和传统自适应 VSG 都有明显的改善。

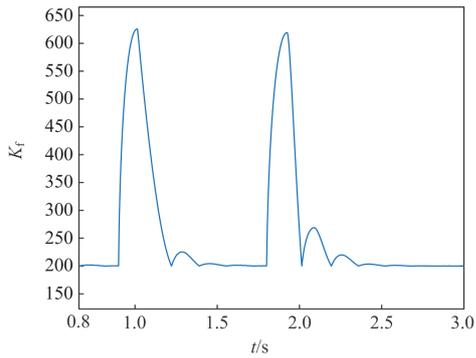
图 12 是有功指令切换下的虚拟参数变化, 理论分析下 J 、 D 、 K_f 的变化在约束范围内, 可知 D 在第二阶段下降速度更为缓慢, 系统暂态响应效果更好。



(a) 虚拟惯量变化



(b) 阻尼系数 D 变化



(c) 有功下垂系数 K_f 变化

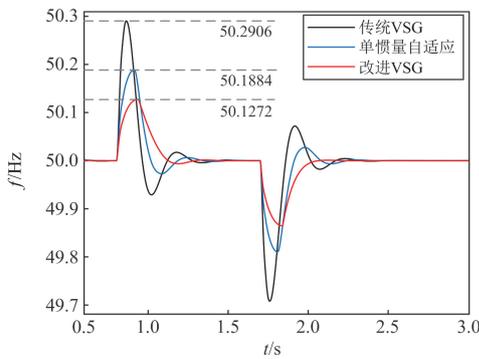
图 12 有功指令切换下的虚拟参数变化

Fig. 12 Changes of virtual parameters under active command switching

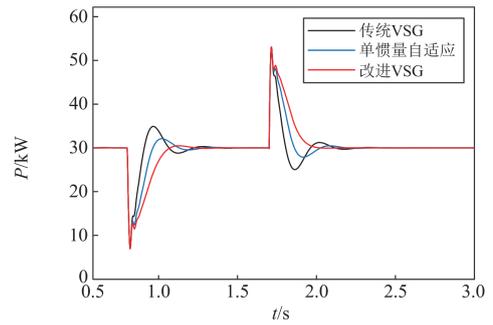
3.2 有功负荷切换

为了验证本地负荷投切对 VSG 频率和功率变化的影响, 将本地负荷设置为在 0.8 s 时由 30 kW 变成 10 kW, 在 1.7 s 时又投入 20 kW。频率 f 和有功输出功率 P 的变化如图 13 所示。

由图 13 可知, 相同的工况下, 采用本文设计的 J 、 D 、 K_f 联合自适应策略时, 频率波动量由原来的 0.2906 Hz 降低至 0.1272 Hz, 减少了 56.23%, VSG 的输出频率也能更快进入稳态范围; 关于输出功率波动方面, 三者区别不大, 采用联合自适应控制方法功率变动相对平缓一些。



(a) 频率变化



(b) 功率变化

图 13 负荷指令切换下的有功-频率变化

Fig. 13 Active power-frequency change under load instruction switching

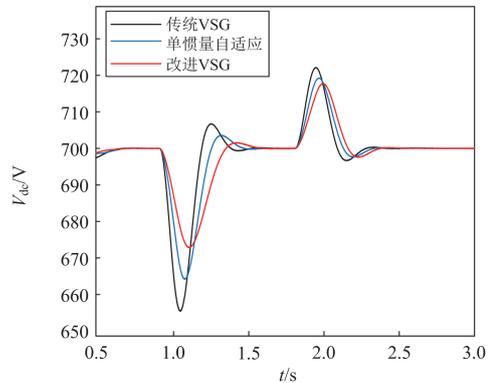
3.3 光储系统出力情况

设置系统工况为有功指令值在 0.9 s 时由 20 kW 变为 40 kW, 在 1.8 s 时变为 30 kW。光伏出力、直流母线电压以及储能出力的变化如图 14 所示。

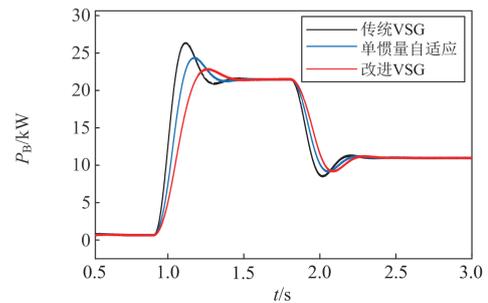
由图 14 可知, 改进的 VSG 自适应算法在电源侧不仅能更好地维持直流母线电压, 还能降低储能系统的有功输出压力, 而且储能系统释放的能量也更少, 对光伏系统的出力几乎不影响, 依然维持最大功率输出。

3.4 电网电压跌落

为验证所提方法在电压跌落时的大扰动工况下具有良好的稳定性, 将设定两种工况: (1) 功率指令



(a) 直流母线电压 V_{dc} 变化



(b) 储能电池功率 P_B 变化

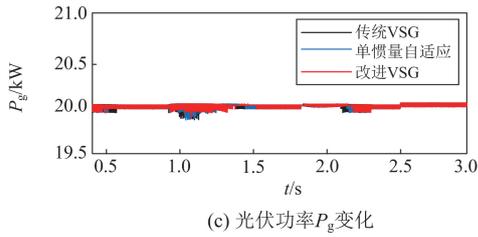
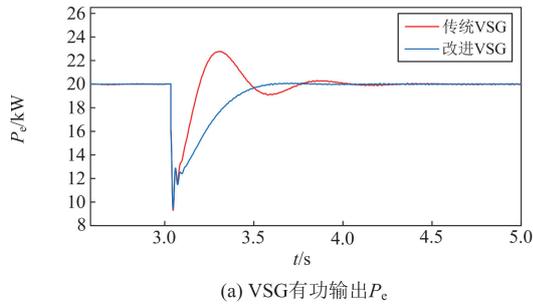


图 14 有功指令切换下对直流侧影响

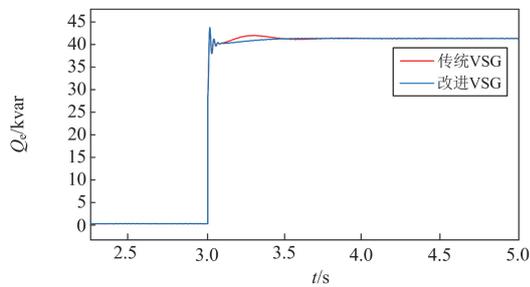
Fig. 14 Influence of active power instruction switching on the DC side

为 20 kW, 电压跌落 50%; (2) 有功指令为 40 kW, 电压跌落 50%, 分别验证所提方法的有效性。

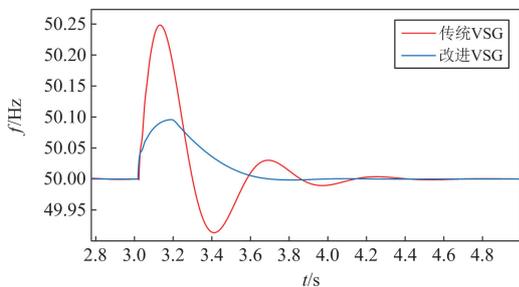
如图 15 所示, 在有功指令为 20 kW、电压跌落 50%工况时, 有功输出和无功输出都有较大波动, 由于存在无功下垂控制, VSG 能够像同步发电机一样提



(a) VSG有功输出 P_e



(b) VSG无功输出 Q_e



(c) VSG频率 f 变化

图 15 大扰动工况一下 VSG 功率输出和频率变化
Fig. 15 VSG power output and frequency variation for large disturbance condition I

供无功支撑, 维持 VSG 输出电压, 可见改进 VSG 的功率波动更小。无论是有功还是无功, 改进 VSG 输出波动均小于传统 VSG。在频率波动方面, 改进 VSG 的波动情形与小干扰一样小于传统 VSG。

面对较小功率指令情形, 无论是传统 VSG 还是改进 VSG, 都有足够大的减速区间, 均不会失稳。当功率指令提升一倍时, 系统失稳的风险急剧上升。图 16 是有功指令为 40 kW 时的功角频率相平面图, 传统 VSG 和改进 VSG 的 J 、 D 初值都为图 10 中失稳区域的试验点取值。

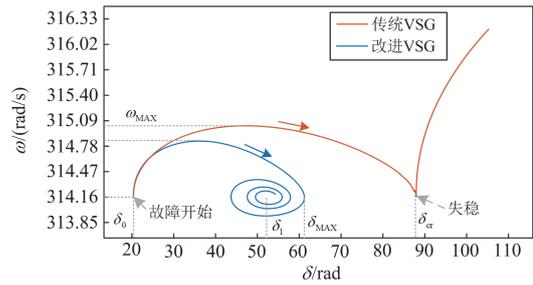


图 16 大扰动工况二 VSG 相平面图

Fig. 16 VSG phase plan view of large disturbance case II

从图 16 可以看出, 面对同样的电压跌落, 虽然改进 VSG 调节很缓慢, 但是不会失稳; 而传统 VSG 则已经失稳, 这和上述分析相对应。即使 J 的取值变大, 但是在更大的阻尼约束下, 系统也不容易失稳。因此为了应对更严重的大扰动工况, 将参数的取值进行进一步的限定是有必要的。

4 结论

改进 VSG 三参数自适应控制改善了系统发生扰动时的响应特性。在惯量控制部分, 采用分段判别式实现 J 的自适应变化; 阻尼控制部分引入频率差值积分的方法, 防止阻尼系数下跌过快, 有助于进一步抑制波动。此外, 为了加强自适应算法的敏感性, 引入了有功下垂系数自适应变化函数。在 2.2 节稳定性分析的基础上, 为了使系统拥有足够的稳定裕度, 本文根据系统相角稳定裕度计算了 J 、 D 变化范围以及设计了自适应变化系数, 并根据电网标准得出有功下垂系数的取值范围。在小扰动分析的基础上对大扰动情形下 D 的取值进一步限定, 使系统面对电压大幅跌落时有更好的稳定性。最后在 Matlab/Simulink 的 VSG 仿真模型上进行了验证, 可以得出以下结论。

1) 通过对比发现 J 、 D 、 K_f 的联合自适应拥有更好的动态特性, 频率的超调量和调节时间相对于传统 VSG 来说, 都有着较为明显的改善, VSG 的

有功输出也拥有较低的超调,使得储能系统出力增幅更为平缓,降低了储能系统的有功输出压力。

2) 阻尼系数 D 的设计考虑到变化函数在第二阶段不能持续增大,此时引入频率差值积分项,既兼顾有功输出快速达到指令值又能使输出频率快速减小。

3) 通过对光储系统的出力分析发现,采用本文的改进型自适应算法后,系统储能的输出压力有所降低,并且直流母线电压的波动也更小,相对传统 VSG 而言,在一定程度上提升稳定性。

4) 通过对系统大扰动的分析,并对 J 、 D 取值进一步限定后,改进 VSG 能够通过对其的实时调节,在极端情况表现出更好的稳定性。

参考文献

- [1] 潘崇超, 侯孝旺, 金泰, 等. 计及阶梯碳交易和可再生能源不确定性的综合能源系统低碳研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 8-16.
PAN Chongchao, HOU Xiaowang, JIN Tai, et al. Low carbon research on integrated energy system considering the tiered carbon trading and the uncertainties of renewable energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 8-16.
- [2] 温源远, 蓝艳, 于晓龙, 等. 可再生能源的发展现状及趋势[J]. 环境保护, 2024, 52(5): 68-72.
WEN Yuanyuan, LAN Yan, YU Xiaolong, et al. The development status and trends of renewable energies[J]. Environmental Protection, 2024, 52(5): 68-72.
- [3] 李程昊, 蒋芒, 姚德贵, 等. 高比例可再生能源电力系统的日前-日内两级无功功率滚动调度方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 94-103.
LI Chenghao, JIANG Mang, YAO Degui, et al. Day-ahead and intra-day two-stage reactive power rolling dispatch method for power systems with high renewable power penetration[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 94-103.
- [4] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [5] 唐杰, 李帅. 高渗透率新能源并网对电网频率特性参数的影响分析[J]. 电工技术, 2023(4): 58-62, 133.
TANG Jie, LI Shuai. Analysis of the influence of grid-connected high permeability new energy on the frequency characteristics of power grid[J]. Electric Engineering, 2023(4): 58-62, 133.
- [6] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [7] 王强强, 姚良忠, 徐箭, 等. 基于切片采样-马尔科夫链蒙特卡洛模拟的高比例新能源电力系统等效惯量概率评估[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 140-152.
WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, XU Jian, et al. S-MCMC based equivalent inertia probability evaluation for power systems with high proportional renewable energy[J]. Power System Technology, 2018, 48(1): 140-152.
- [8] 赵辉, 王涛, 胡平, 等. 改进 VSG 和下垂控制双驱动的孤岛微电网稳定运行控制策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-12[2024-03-26]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001401>.
ZHAO Hui, WANG Tao, HU Ping, et al. Improved control strategy for stabilized operation of islanded microgrid with dual drive of VSG and droop control[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA: 1-12[2024-03-26]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001401>.
- [9] 龚仁喜, 黎洛琦, 王奇. 一种虚拟同步发电机自适应阻尼补偿方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 83-88.
GONG Renxi, LI Luoqi, WANG Qi. An adaptive damping compensation method for virtual synchronous generators[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 83-88.
- [10] 赵炳洋, 赵波, 胡娟, 等. 考虑 VSG 构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 39-47.
HAO Bingyang, ZHAO Bo, HU Juan, et al. Adaptive strategy considering transient and steady-state optimization of VSG Grid-forming Energy Storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 39-47.
- [11] 杨桂兴, 郭小龙, 孙谊娟, 等. 虚拟同步发电机频率偏差前馈阻尼控制策略的参数整定方法[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 46-53.
YANG Guixing, GUO Xiaolong, SUN Yiqian, et al. Parameter tuning method of frequency deviation feedforward based damping control strategy for virtual synchronous generator[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 46-53.
- [12] 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.
- [13] KARIMI A, KHAYAT Y, NADERI M, et al. Inertia response

- improvement in AC microgrids: a fuzzy-based virtual synchronous generator control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(4): 4321-4331.
- [14] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(4): 137-144.
YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(4): 137-144.
- [15] 李德胜, 李国策, 刘博. 基于虚拟同步发电机控制技术的 V2G 系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(7): 127-133.
LI Desheng, LI Guoce, LIU Bo. Research on V2G system based on virtual synchronous generator control technology[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(7): 127-133.
- [16] 姚文龙, 裴春博, 池荣虎, 等. 基于智能自学习控制的船舶微电网预同步控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 82-93.
YAO Wenlong, PEI Chunbo, CHI Ronghu, et al. Pre-synchronization control strategy for a microgrid of merchant marine with intelligent self-learning control[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 82-93.
- [17] 杨效, 曾成碧, 苗虹, 等. 优化虚拟同步发电机惯量和阻尼的自适应控制策略[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(11): 495-504.
YANG Xiao, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. Optimizing adaptive inertia and damping control strategy of virtual synchronous generator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(11): 495-504.
- [18] WANG F, ZHANG L, FENG X, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 5124-5133.
- [19] LI M, HUANG W, TAI N, et al. A dual-adaptivity inertia control strategy for virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 35(1): 594-604.
- [20] WU H, WANG X. 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.
- [21] ZHANG L, WANG X, ZHANG Z, et al. An adaptive control strategy for interfacing converter of hybrid microgrid based on improved virtual synchronous generator[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(2): 261-273.
- [22] LIANG X, ANDALIB-BIN-KARIM C, LI W, et al. Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 57(1): 46-60.
- [23] 程静, 胡健雄, 王维庆, 等. 基于虚拟同步机的风光储并网系统自适应功频控制策略[J]. *现代电力*, 2024, 41(5): 878-885.
CHENG Jing, HU Jianxiong, WANG Weiqing, et al. Adaptive power frequency control strategy for wind/photovoltaics/storage grid connected system based on virtual synchronizer generator[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(5): 878-885.
- [24] 杨赟, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 125-131.
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 125-131.
- [25] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(11): 72-77.
LI Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 72-77.
- [26] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 虚拟同步发电机的参数自适应控制策略研究[J]. *电气工程学报*, 2021, 16(3): 17-24.
GENG Haoxiang, WANG Weijun, TANG Shuai, et al. Research on parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2021, 16(3): 17-24.
- [27] CHEN M, ZHOU D, BLAABJERG F. Enhanced transient angle stability control of grid-forming converter based on virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69(9): 9133-9144.
- [28] 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/OL]. *中国电机工程学报*, 1-15[2024-05-14]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.p.csee.232145>.

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-06-16

作者简介:

陈杰(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网控制技术; E-mail: 107552201530@stu.xju.edu.cn

程静(1980—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与并网控制; E-mail: 157511515@qq.com

王维庆(1959—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为可再生能源发电与继电保护。E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 姜新丽)