

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230362

基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略

江世明^{1,2}, 唐杰¹

(1. 邵阳学院信息科学与工程学院, 湖南 邵阳 422000; 2. 湘西南农村信息化服务
湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 针对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)并网运行时在有功指令和电网频率扰动下存在输出有功暂态振荡问题, 提出了一种基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略。首先, 基于状态反馈理论, 分析了所提控制方法的物理意义, 即该策略是通过在常规 VSG 有功控制环中加入角频率和电磁功率的高频分量来增强系统暂态阻尼。然后, 基于所提的控制方法, 建立了系统的有功控制闭环小信号模型, 并通过对系统特征根的根轨迹进行分析揭示了所提控制方法对 VSG 有功功率振荡抑制的影响。并给出了各状态反馈参数的设计准则, 指导了反馈系数的设计。所提控制策略能有效抑制有功指令突变和电网频率突变时 VSG 输出有功功率振荡, 并且不会影响系统的稳态特性。最后, 通过仿真和实验对比分析, 表明所提控制方法具有更好的有功功率振荡抑制效果, 并且能消除稳态偏差, 且适用于不同电网强度。

关键词: 虚拟同步发电机; 有功功率振荡; 暂态阻尼; 根轨迹分析; 状态反馈

Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement

JIANG Shiming^{1,2}, TANG Jie¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China; 2. Hunan Provincial
Key Laboratory of Rural Informatization Services in Southwest Hunan, Shaoyang 422000, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) faces the problem of the output active power oscillation under active power command and grid frequency disturbance under grid-connected operation. In view of this, an improved VSG control strategy based on transient damping enhancement is proposed. First, based on state feedback theory, the physical meaning of the proposed control method is analyzed, and the system transient damping is enhanced by adding high-frequency components of angular frequency and electromagnetic power to the conventional VSG active power control loop. Second, based on the proposed control method, a closed-loop small signal model of the active power control loop is established, and the system characteristic root locus is used to analyze the impact of the proposed control method on VSG active power oscillation suppression. Design guidelines of various state feedback parameters are also provided to guide feedback coefficient design. The proposed control method can effectively suppress VSG output active power oscillations caused by sudden changes in active power commands and grid frequency, without affecting the system's steady-state characteristics. Finally, the simulation and experimental results demonstrate that the proposed method has better active power oscillation suppression performance, eliminates steady-state deviation, and can be applicable to different grid strengths.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2018JJ2367).

Key words: virtual synchronous generator (VSG); active power oscillation; transient damping; root locus analysis; state feedback

0 引言

大规模新能源接入电网, 使得电网呈现高度电

力电子化特性^[1-4], 为了克服电力电子低惯性、弱阻尼的缺点, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制得到广泛关注^[5]。虚拟同步发电机模拟了同步机的惯性和阻尼特性, 在提高系统惯性、频率变化率和保持系统频率稳定性方面具有显著的优势^[6-8]。然而, VSG 控制不可避免地引入了同步发电机的振荡特性^[9-10], 使得当 VSG 并网有功指令或

基金项目: 湖南省自然科学基金项目资助(2018JJ2367); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目资助(2020GK4061); 湖南省企业科技特派员计划项目资助(2021GK5055)

电网频率变化时, VSG 面临严重的有功功率振荡问题^[11-12]。与传统同步机不同, VSG 是电力电子逆变器, 过流能力低, 因此更容易受到有功功率振荡而损坏。

文献[13]指出阻尼系数越小, 会导致输出有功功率的振荡, 但是增加阻尼系数控制会影响逆变器的稳态特性。文献[14]提出通过实时调节惯性系数和阻尼系数的大小, 可抑制暂态过程 VSG 频率和功率的波动, 但是没有考虑稳态偏差问题。文献[15]提出了一种改进的下垂控制方法, 通过检测暂态过程中频率变化率的大小, 建立下垂系数和频率变化率的函数关系, 根据频率变换率动态调整下垂系数, 从而降低了暂态过程中的频率偏差。然而, 文献[15]所提的控制算法需要的计算量比较大, 并且需要整定的参数较多, 增加了系统的控制复杂性。文献[16]提出了基于“负惯性系数”的惯性系数自适应变化控制策略, 用于提高 VSG 控制的灵活性, 但出于频率稳定的考虑, 该方法并不可取。

为了实现在抑制 VSG 暂态有功功率振荡的同时不影响 VSG 的稳态特性, 国内外学者做了较多的相关研究。文献[17]提出基于 Bang-Bang 控制的惯性系数自适应变化控制策略, 通过判断暂态过程中角速度变化率大小以及角速度变化方向, 动态调整惯性系数的大小, 从而抑制暂态过程中的功率振荡, 但这种策略需要实时检测角加速度对时间的导数, 在实际工程应用中较难实现。基于上述基础, 文献[18]进一步提出了一种惯性和阻尼组合自适应变化的控制方法, 也是通过判断暂态过程中角速度变化率的大小以及角速度变化方向, 自适应调整惯性系数和阻尼系数的大小, 但在这个控制策略中, 用于选取惯性系数和阻尼系数大小的判断过程比较复杂, 会给控制器造成较大的计算负担。此外, 如果阈值选取不当, 可能会恶化系统的动态性能。文献[19]通过在 VSG 控制中增加阻尼校正回路, 以自由调节 VSG 的动态响应速度, 其核心思想是创建一个附加的可调参数, 允许不受限制地调整系统阻尼比, 从而在不影响系统的稳态有功-频率下垂控制特性前提下抑制功率振荡。文献[20]提出一种线性功率阻尼和非线性功率阻尼组合的控制方法, 通过线性部分提供与电网的自同步功能, 非线性部分抑制功率振荡, 提高系统的稳定性。然而, 非线性环节的设计过程比较复杂, 并且这种策略会增加有功环和无功环的耦合, 影响系统稳定性。类似地, 文献[21]提出了一种基于 VSG 的逆变型分布式电源的自适应惯性控制算法, 该策略根据频率偏差幅度自适应调节惯性系数, 但该策略会导致 VSG 惯性系数非线性

变化, 多余的非线性特性可能会影响系统性能。文献[22]提出了基于锁相环的阻尼功率反馈的控制方法, 然而该方法需要依赖电网电压信息, 在暂态期间锁相环的动态性会对整体系统稳定性产生不利影响, 尤其是在弱电网中^[23]。文献[24-26]通过引入角频率的纯微分项校正增加系统阻尼, 减小功率振荡, 然而纯微分操作会放大系统的噪声, 不利于系统的稳定性, 并且纯微分环节在实际工程中难以实现, 因此一般不采用。文献[27]提出基于带通阻尼功率反馈的改进 VSG 控制策略提高系统阻尼, 该策略利用带通滤波器对不同频率的增益表现出带通特性, 通过带通阻尼功率反馈通道, 实现功率振荡抑制, 并且不影响系统的稳态特性。然而, 二阶特性的带通滤波器的引入, 会导致系统的阶次变高, 整定参数比较困难。

针对上述问题, 本文从状态反馈角度出发, 提出了一种基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略, 抑制 VSG 并网功率振荡, 并且不影响 VSG 的稳态特性。首先介绍了传统 VSG 并网电力拓扑结构和控制方法, 阐述了传统 VSG 有功控制存在的问题, 包括 VSG 有功功率振荡和稳态偏差问题, 揭示了有功振荡问题和输出功率动稳态特性之间的矛盾。然后提出了暂态阻尼增强的改进 VSG 控制方法, 借助现代控制理论状态反馈的知识展示了所提控制方法的本质意义, 并通过建立系统闭环有功小信号模型, 分析了所提控制方法对系统稳定性的影响, 并给出参数设计过程。最后, 通过仿真和实验证明了所提方法的有效性。

1 VSG 并网电路拓扑及控制方法

图 1 为典型 VSG 并网拓扑及其控制结构, 其为传统 VSG 控制算法。

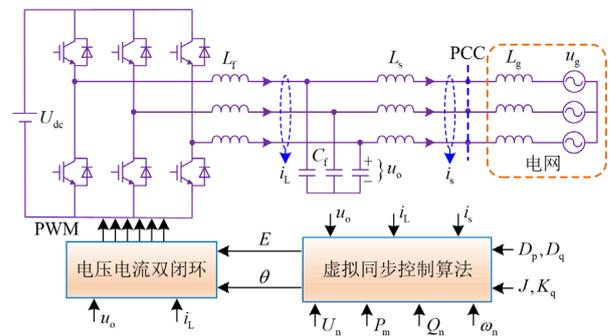


图 1 典型 VSG 并网拓扑及控制

Fig. 1 Typical VSG grid-connected topology and control

图 1 中: U_{dc} 为直流侧电压; L_f 、 L_s 均为 LCL 滤波器的滤波电感; C_f 为滤波电容; L_g 为电网等

效电感； u_o 为逆变器输出的三相电压； i_L 为逆变器侧输出的三相电流； u_g 和 i_g 分别为三相电网电压和电网电流。

图 2 中： ω 和 ω_n 分别为 VSG 输出角频率及其额定值； θ 为转子角度； J 为惯性系数； s 为微分算子； D_p 和 D_q 分别为阻尼系数和电压下垂系数； K_q 为无功功率调节惯性系数； P_m 和 Q_n 分别为 VSG 的机械输入功率和无功功率的参考值； P_c 和 Q_c 分别为 VSG 输出有功功率和无功功率； U_n 、 U_o 和 E 分别为 VSG 的额定电压、输出电压和内电势的有效值。

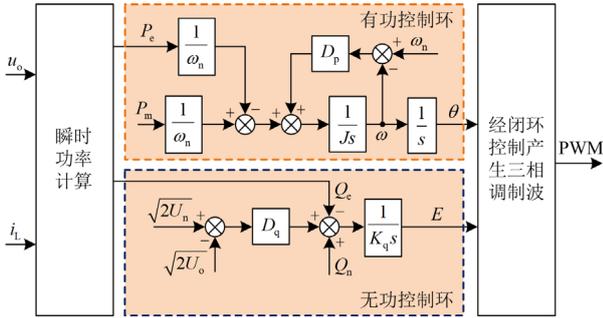


图 2 传统 VSG 控制算法

Fig. 2 Traditional control algorithm of VSG

根据图 2，VSG 控制时的有功控制环和无功控制环的数学方程分别如式(1)、式(2)所示。

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

$$Q_n - Q_c + \sqrt{2} D_q (U_n - U_o) = K_q \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可知，VSG 有功控制环和无功控制环分别模拟了同步发电机有功-频率特性和无功-电压特性，有功控制环输出为逆变器调制波的频率和相位，无功控制环输出为逆变器调制波的幅值。

此外通过 $P-\omega$ 下垂控制器获得 VSG 的机械输入功率 P_m ，实现一次频率调节功能，如式(3)所示。

$$P_m = P_{ref} + K_\omega (\omega_n - \omega) \quad (3)$$

式中： P_{ref} 为有功功率指令值； K_ω 为下垂系数。

本文重点研究 VSG 有功环节暂态响应问题，考虑线路阻抗近似呈感性，VSG 的有功环和无功环可认为解耦^[23]，因此后续内容不再讨论无功功率。

2 传统 VSG 有功控制存在的问题

2.1 有功功率振荡的机理

VSG 输出电压与电网电压的相位角差为功率角，通常在正常运行条件下功率角一般小于 30° ，因

此可得 VSG 输出的有功功率的表达式为^[28]

$$P_c = \frac{3EU_g \sin \delta}{X_l} \approx K \delta = K \frac{\omega - \omega_g}{s} \quad (4)$$

式中： U_g 为电网电压幅值； X_l 为等效线路阻抗，包括 VSG 输出阻抗、线路阻抗和电网阻抗； K 为 VSG 的同步系数； ω_g 为电网电压角频率。

在分析功率振荡机理时，由于 VSG 的电压电流控制内环的响应速度远远快于功率外环，因此在建立 VSG 的有功环小信号模型时，可以忽略内环的动态响应^[29]。令 $D_\omega = D_p \omega_n$ ，由式(3)和式(4)可以得到 VSG 有功闭环控制框图。图 3 为 VSG 有功功率控制回路的小信号控制框图，其中“ Δ ”表示物理量的小信号扰动量。

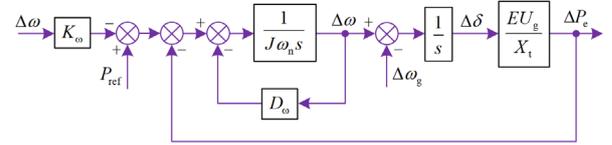


图 3 VSG 有功环小信号控制框图

Fig. 3 Small signal control block diagram of VSG

根据图 3，可以得到 VSG 有功功率闭环传递函数的小信号模型，如式(5)所示。

$$\Delta P_c = G_{pp}(s) \Delta P_{ref} + G_{p\omega}(s) \Delta \omega_g = \frac{K}{J \omega_n s^2 + (D_\omega + K_\omega) s + K} \Delta P_{ref} - \frac{K(J \omega_n s + D_\omega + K_\omega)}{J \omega_n s^2 + (D_\omega + K_\omega) s + K} \Delta \omega_g \quad (5)$$

其中：

$$\begin{cases} G_{pp}(s) = \left. \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{ref}} \right|_{\Delta \omega_g=0} = \frac{K}{J \omega_n s^2 + (D_\omega + K_\omega) s + K} \\ G_{p\omega}(s) = \left. \frac{\Delta P_c}{\Delta \omega_g} \right|_{\Delta P_{ref}=0} = \frac{-K(J \omega_n s + D_\omega + K_\omega)}{J \omega_n s^2 + (D_\omega + K_\omega) s + K} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $G_{pp}(s)$ 表示有功功率指令值扰动对 VSG 输出功率的响应； $G_{p\omega}(s)$ 表示电网频率扰动对 VSG 输出功率的响应。

由式(5)可知，VSG 有功功率输出受到有功指令和电网频率两种扰动的影响。由式(6)可知， $G_{pp}(s)$ 为典型的二阶系统，惯性系数 J 的引入使 VSG 有功系统成为典型的二阶振荡系统，在有功指令或电网频率下，VSG 将出现输出有功功率振荡、超调问题，其阻尼比 ξ 和自然振荡频率 ω_{nat} 如式(7)所示。

$$\xi = \frac{D_\omega + K_\omega}{2\sqrt{KJ\omega_n}}, \quad \omega_{nat} = \sqrt{\frac{K}{J\omega_n}} \quad (7)$$

根据式(7)可知, 系统阻尼比与 J 和 D_ω 有关, 增大阻尼系数 D_ω 、下垂系数 K_ω 或减小惯性系数 J 均可增大阻尼比, 从而减小有功功率振荡。

VSG 的有功功率控制环的闭环极点的轨迹图如图 4 所示。当 J 不变时, 随着 D_ω 的增加, 极点 S_1 先逐渐远离虚轴并靠近实轴, 最后 S_1 落在负实轴上并继续远离虚轴。极点 S_2 先远离虚轴并逐渐靠近实轴, 之后也落在负实轴上, 并逐渐靠近虚轴, 上述过程可表示为一对共轭复数极点随着 D_ω 的增加最终变成两个负实极点, 因此系统由欠阻尼变为过阻尼, 表明随着 D_ω 的增大, 系统阻尼增加。当 D_ω 取值相同时, J 取值较大的一对共轭复数极点比 J 取值较小时的共轭复数极点更加靠近虚轴, 表明 J 越大, 系统阻尼越小。此外, 根据图 4 可以看出振荡频率主要由 J 决定, D_ω 基本上不影响振荡频率。上述分析和式(7)所体现的物理意义相符合。

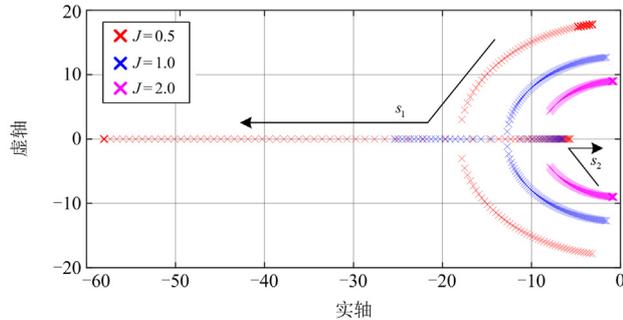


图 4 当 J 不同时, D_ω 增大时 VSG 的有功闭环小信号模型极点分布

Fig. 4 Pole distribution of active power closed-loop small signal model of VSG with different J when D_ω increases

2.2 稳态偏差问题

根据式(6)中的 $G_{P_\omega}(s)$ 可知, 电网频率改变后, 在系统达到稳态时, VSG 输出有功功率的稳态误差 \bar{P}_e 如式(8)所示。

$$\bar{P}_e = \lim_{s \rightarrow 0} G_{P_\omega}(s) \Delta \omega_g = -(D_\omega + K_\omega) \Delta \omega_g \quad (8)$$

由式(8)可知, VSG 输出有功功率的稳态误差 \bar{P}_e 受下垂系数和阻尼系数的影响, 阻尼系数越大, 有功功率的稳态误差也越大。因此阻尼系数存在设计裕度小的问题, 即较大的阻尼系数可以有效抑制功率振荡, 但是会增加有功功率稳态误差; 而较小的阻尼系数能够减小稳态误差, 但是无法有效抑制功率振荡。因此, 传统固定阻尼系数的方法对 VSG 稳态和动态特性调节存在一定矛盾。

综上所述, 实际应用中为了保证较大的系统惯性, 通常会选取较大的惯性系数 J , 同时需要较大

的 D_ω 才能有效抑制功率振荡, 但是较大的 D_ω 会导致较大的功率稳态误差。因此 J 和 D_ω 对动态和暂态特性相互制约, 无法兼顾动态特性和静态指标的双重需求。

3 增强暂态阻尼的改进 VSG 控制

针对 J 和 D_ω 选取无法兼顾动态特性和稳态特性的问题, 本文基于现代控制理论, 提出一种基于状态反馈控制的改进 VSG 控制策略, 能够有效抑制 VSG 有功功率振荡, 并且不影响 VSG 的稳态特性。下面将从状态反馈控制方面详细分析所提控制策略的机理。

3.1 VSG 有功控制环改进控制分析

为了抑制功率振荡, 在有功控制环表达式(1)中增加了一个修正项 u , 则改进的有功环如式(9)所示。

$$P_{\text{ref}} - P_e - (K_\omega + D_\omega)(\omega - \omega_n) + u = J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

将式(9)进行变换, VSG 的输出功率可表示为

$$P_e = u + P_{\text{ref}} + (K_\omega + D_\omega)\omega_n + (K_\omega + D_\omega)\omega_s - \left[(K_\omega + D_\omega) \int \frac{d\omega}{dt} dt + J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \right] = \quad (10)$$

$$u + P_{\text{ref}} + C - \left[(K_\omega + D_\omega) \int \frac{d\omega}{dt} dt + J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \right]$$

式中: ω_s 是系统频率的初始值, 为一个常数; C 也为常数项, $C = (K_\omega + D_\omega)(\omega_n + \omega_s)$ 。

根据式(10)可知, VSG 的输出功率可以看成是一个关于 $d\omega/dt$ 的函数, 即角加速度经过比例积分控制器, 再叠加有功功率指令值 P_{ref} 和常数项 C 可以得到输出有功功率 P_e , 比例增益和积分增益分别为 $(K_\omega + D_\omega)$ 和 $J\omega_n$ 。考虑式(10)的小信号模型, 其在频域的表达式如式(11)所示。

$$\Delta P_e(s) = \Delta u(s) + \Delta P_{\text{ref}}(s) - \left(J\omega_n + \frac{(K_\omega + D_\omega)}{s} \right) \Delta \dot{\omega}(s) \quad (11)$$

由式(11)可知, VSG 输出有功功率 $P_e(s)$ 的振荡特性是由 $\dot{\omega}(s)$ 和 $u(s)$ 的极点决定的。如果 $\dot{\omega}(s)$ 和 $u(s)$ 引入共轭复数主导极点, 则输出有功功率将发生振荡。如果 $\dot{\omega}(s)$ 和 $u(s)$ 只引入负实极点, 则在输出功率中不会观察到振荡。因此, 为了抑制功率振荡, $\dot{\omega}(s)$ 和 $u(s)$ 的极点都应为负实极点。此外, 为了不影响 VSG 的稳态特性, 在稳态时, $u(s)$ 应为 0。

3.2 增强暂态阻尼的改进 VSG 控制策略的物理本质

基于上述分析, 借鉴现代控制理论知识, 将 $\Delta \dot{\omega}$ 当成一个状态变量。将式(11)求导可得到式(12)。

$$\Delta \dot{P}_e = \Delta \dot{P}_{ref} - J\omega_n \Delta \dot{\omega} - (K_\omega + D_\omega) \Delta \dot{\omega} + \Delta \dot{u} \quad (12)$$

则有

$$\Delta \ddot{\omega} = \frac{\Delta \dot{P}_{ref} - \Delta \dot{P}_e - (K_\omega + D_\omega) \Delta \dot{\omega} + \Delta \dot{u}}{J\omega_n} \quad (13)$$

因为引入的修正信号也需要被控制, 将 Δu 当成第二个状态变量。引入中间变量 $\Delta \chi$, 并定义为

$$\Delta \chi = \Delta \dot{u} \quad (14)$$

由式(5)可知, 实际扰动来自有功参考功率的变化和电网频率的变化, 并且所有这些扰动都会反映在 ΔP_e 的变化中。因此, ΔP_e 包含了实际扰动的信息, 并且在稳态时 VSG 输出有功功率 ΔP_e 的导数 $\Delta \dot{P}_e$ 等于 0, 因此将 $\Delta \dot{P}_e$ 当成第三个状态变量, 实际上是输出反馈。综上, 考虑将 $\Delta \dot{P}_e$ 、 $\Delta \dot{\omega}$ 和 Δu 当成状态变量, 可以得到状态空间表达式如式(15)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \ddot{\omega} \\ \Delta \dot{u} \\ \Delta \dot{P}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_\omega + D_\omega}{J\omega_n} & 0 & -\frac{1}{J\omega_n} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta u \\ \Delta \dot{P}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J\omega_n} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \chi + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \dot{P}_e + \begin{bmatrix} \frac{1}{J\omega_n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta \dot{P}_{ref} \quad (15)$$

将式(15)所示模型与标准状态空间模型进行比较, $\Delta \chi$ 可视为输入。根据状态反馈理论, 控制信号 $\Delta \chi$ 定义为

$$\Delta \chi = -[k_1 \quad k_2 \quad k_3][\Delta \dot{\omega} \quad \Delta u \quad \Delta \dot{P}_e]^T \quad (16)$$

式中, k_1 、 k_2 、 k_3 均为反馈增益。根据式(16)可以得到

$$\Delta \chi = -k_1 \Delta \dot{\omega} - k_2 \Delta u - k_3 \Delta \dot{P}_e \quad (17)$$

对式(17)进行拉氏变换, 再经过数学变换得到式(18)。

$$\Delta u = \frac{-k_1 s}{s + k_2} \Delta \omega - \frac{k_3 s}{s + k_2} \Delta P_e \quad (18)$$

式(18)中 $\frac{k_1 s}{s + k_2}$ 本质为一个高通滤波器, $\Delta \omega$ 通过 $\frac{k_1 s}{s + k_2}$ 环节可以得到角频率的高频分量, ΔP_e 通过 $\frac{k_3 s}{s + k_2}$ 环节可以得到有功功率的高频分量。从式(18)可以看出, 修正信号 u 包含角频率的高频分量和有

功率的高频分量。因此, 将式(18)写成一个更加通用的形式, 即

$$\Delta u = -\frac{k_1 s}{s + k_2} \Delta \omega - \frac{k_3 s}{s + k_4} \Delta P_e \quad (19)$$

式中, k_4 为一个常数。

应该注意的是, 式(15)仍不是标准的状态空间方程, 可以进一步进行扩展处理, 但是扩展的状态变量越多, 微分项就越多, 这在实际中是无法实现的。改进 VSG 的有功控制环的控制框图如图 5 所示, 通过引入输出有功功率高频分量和角频率高频分量, 改善 VSG 的阻尼特性, 此外, 根据式(19)可知, 当系统达到稳态时, u 变为 0, 因此所提方法不会影响系统的稳态特性。

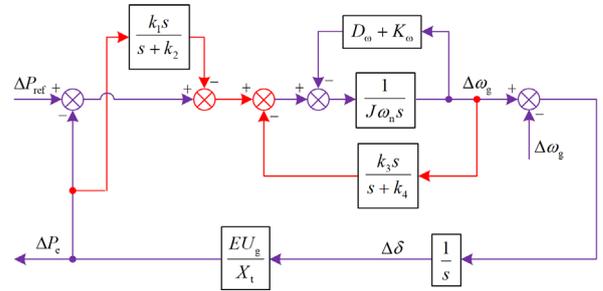


图 5 基于所提控制方法的改进 VSG 闭环有功控制框图
Fig. 5 Block diagram of closed-loop active power control of improved VSG based on the proposed control method

3.3 稳定性分析

根据图 5 得到基于所提控制方法的改进 VSG 闭环有功控制的传递函数, 如式(20)所示。

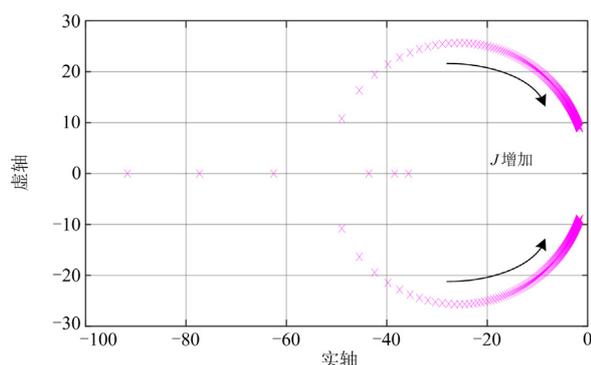
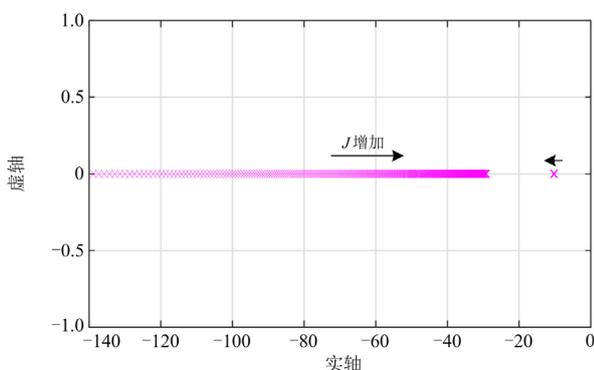
$$\Delta P_e = G_{PP_enhance}(s) \Delta P_{ref} + G_{P\omega_enhance}(s) \Delta \omega_g = \frac{s + k_4}{A + B} \Delta P_{ref} - \frac{A \cdot K}{A + B} \Delta \omega_g \quad (20)$$

其中:

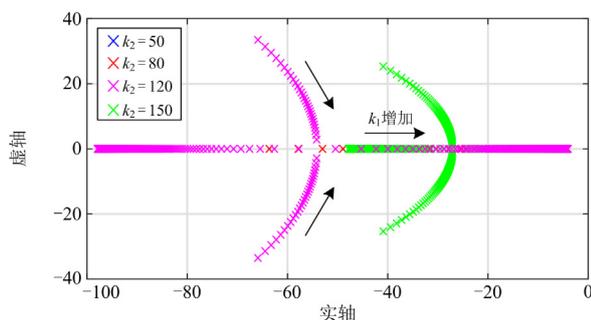
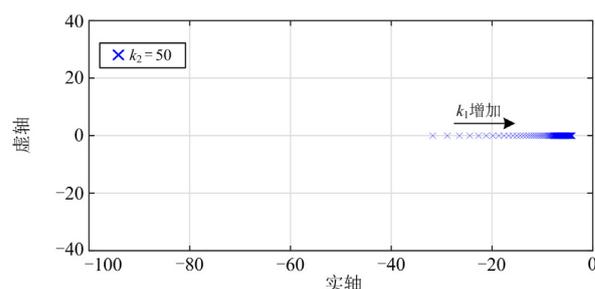
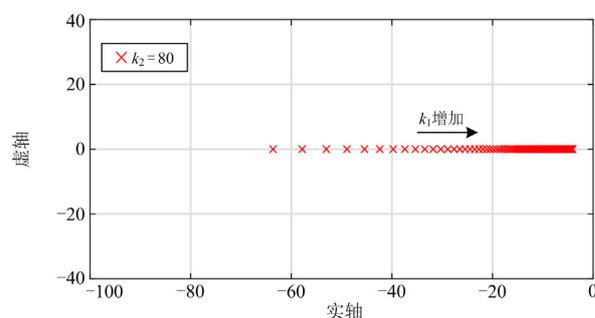
$$\begin{cases} A = \frac{[J\omega_n s^2 + (D_\omega + K_\omega)s](s + k_4) + k_3 s}{K} \\ B = (s + k_4) + (s + k_4) \frac{k_1 s}{s + k_2} \end{cases} \quad (21)$$

传统 VSG 控制下当 J 增加时系统极点的轨迹图, 如图 6 所示。随着 J 的增加, 一对共轭虚根靠近虚轴移动, 表示系统阻尼减小, 系统容易发生有功功率振荡。

在所提控制方法下, 当 J 增大时系统极点的根轨迹如图 7 所示。所提的控制策略可以使系统极点都为负实极点, 这表明系统阻尼增大, 能够有效抑制有功功率振荡。

图 6 传统 VSG 控制下 J 增加时系统极点轨迹图Fig. 6 Dominated poles distribution when J increases under the traditional VSG control method图 7 所提控制方法下 J 增加时系统极点轨迹图Fig. 7 Dominated poles distribution when J increases under the proposed control method

当频率反馈相关参数 k_1 和 k_2 变化时, 系统极点的轨迹图如图 8 所示。当 k_2 取值为 50 时, 系统极点轨迹图如图 9 所示。当 k_2 取值为 80 时, 系统极点轨迹图如图 10 所示。

图 8 所提控制方法下当 k_2 取不同值时, k_1 从 500 增加到 2000 时系统极点轨迹图Fig. 8 Dominated poles of the proposed control when k_1 increases from 500 to 2000 with different k_2 图 9 所提控制方法下当 $k_2=50$ 时, k_1 从 500 增加到 2000 时系统极点轨迹图Fig. 9 Dominant poles of the proposed control when k_1 increases from 500 to 2000 when $k_2=50$ 图 10 所提控制方法下当 $k_2=80$ 时, k_1 从 500 增加到 2000 时系统极点轨迹图Fig. 10 Dominant poles of the proposed control when k_1 increases from 500 to 2000 when $k_2=80$

如图 9 和图 10 所示, 当 k_2 为 50 和 80 时, k_1 从 500 增加到 2000, 系统的极点都分布在负实轴上, 表明此时系统能够有效抑制有功功率振荡。并且在 k_1 取值相同的情况下, k_2 取值为 80 时, 其极点相比 k_2 取值为 50 时更加远离虚轴, 这意味着当 k_2 取值较大时系统具有更快的响应速度。当 k_2 取值更大时(例 $k_2=120$ 或 $k_2=150$), 如图 8 所示, 此时系统会出现一对共轭复数极点, 表明此时系统的阻尼较小, 会出现有功功率振荡。随着 k_1 的增加, 这一对共轭复数极点会靠近实轴, 最终共轭复数极点消失, 系统的极点都分布在负实轴上。因此, k_1 的值不应该取太小, 并且 k_2 的取值也不应该太小。因此为了有效抑制有功功率振荡, 并且保证系统的快速性, k_1 和 k_2 取值分别为 1500 和 80。

当功率反馈相关参数 k_3 和 k_4 变化时, 系统极点的轨迹图如图 11 所示。由图 11 可知, 当 k_3 取值较小时, 系统极点为一对共轭复数极点, 随着 k_3 的增加, 这对共轭复数极点相交, 并变成两个负极点, 表明

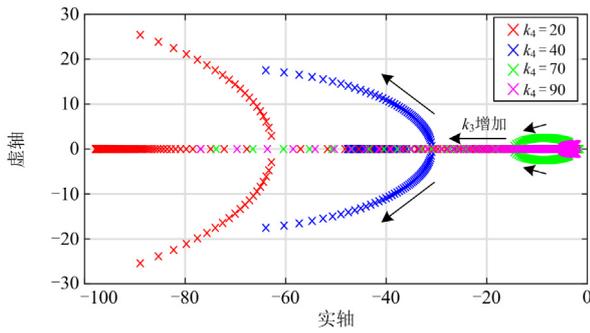


图 11 所提控制方法下当 k_4 取不同值时, k_3 从 10 增加到 100 时系统极点轨迹图

Fig. 11 Dominant poles of the proposed control when k_3 increases from 10 to 100 with different k_4

系统阻尼增大、系统有功功率振荡能够得到有效控制。如果 k_4 取值较小(例如 $k_4 = 20$ 或者 $k_4 = 40$)时,随着 k_3 的增加,依然会存在一对共轭复数极点。因此 k_4 的取值应较大,但又不能过大,因为从式(19)可以看出,过大的 k_4 将导致式(19)等号右边第二项变为微分项,而微分操作将放大系统噪声,不利于系统稳定性。此外,根据上述分析,为了有效抑制有功功率振荡, k_3 的取值不能过大,也不能过小。综上所述, k_3 和 k_4 取值分别为 40 和 70。

4 仿真验证

为验证本文所提策略的有效性,在 Matlab/Simulink 上搭建了如图 1 所示的 VSG 并网仿真模型,主要仿真参数如表 1 所示。仿真工况为 2 s 时 VSG 的有功功率指令值 P_{ref} 从 10 kW 突变为 30 kW,在 4 s 时电网频率突变为 50.5 Hz,5 s 时电网频率又变为 50 Hz。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main system parameters

参数	取值	参数	取值
U_{dc}/V	700	$J/(kg/m^2)$	2
U_n/V	220	D_p	20
U_g/V	220	D_q	50
$\omega_n/(\text{rad/s})$	100π	L_t/mH	3
L_s/mH	1	$C_f/\mu F$	100

4.1 传统固定阻尼系数控制策略

采用传统固定阻尼策略时不同固定阻尼系数的仿真结果如图 12 所示。当阻尼系数 D_p 取值为 20 时,在 2 s 时有功功率指令值阶跃使 VSG 发生了持续时间约 1.8 s 的输出有功振荡,并且有功超调为 10.7 kW;在 4 s 时电网频率阶跃,有功振荡依然明

显。当 D_p 增大为 30 时, VSG 输出有功功率依然存在振荡,振荡持续时间约为 1 s,有功超调为 5.5 kW;在 4 s 时当电网频率阶跃变化时,相比于 $D_p = 20$ 时的功率波形,此时有功振荡不太明显,此时稳态误差为 6 kW。当 D_p 增大为 50 时,当有功指令突变时,有功功率存在一点超调,有功功率基本没有振荡,但是在电网频率阶跃变化时,有功功率稳态误差为 10 kW。

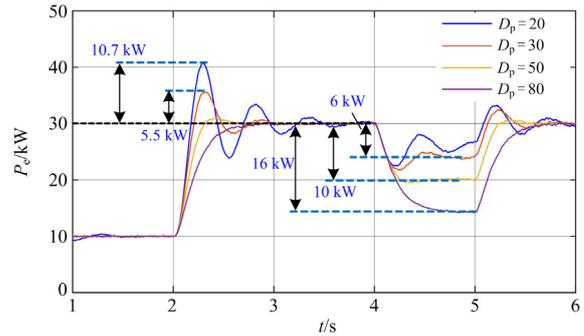


图 12 传统固定阻尼策略下不同固定阻尼系数的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of different fixed damping coefficients under traditional fixed damping strategy

当 D_p 进一步增大为 80 时,在有功指令和电网频率突变时, VSG 输出有功功率能够平滑过渡,有功功率没有振荡,且没有超调,此时有功稳态偏差高达 16 kW。因此可知,固定阻尼系数控制策略下,随着固定阻尼系数的增大, VSG 的有功振荡可以得到有效抑制,但是同时增加了有功稳态偏差。

4.2 所提控制策略仿真验证

为验证本文所提策略的有效性,进行了固定阻尼策略、角频率高频分量补偿控制策略、有功功率高频分量补偿控制策略以及本文所提暂态阻尼增强改进 VSG 控制策略 4 种 VSG 功率振荡抑制策略的仿真,如图 13 所示。当 $k_1 \neq 0$ 、 $k_3 = 0$ 时,即只引入角频率高频分量时,在 2 s 时有功指令突变,有功功率依旧存在明显的振荡,且有功超调为 6.7 kW,达到稳态时间约为 0.8 s,在 4 s 时电网频率突变,此时有功稳态误差约为 5.4 kW。当 $k_1 = 0$ 、 $k_3 \neq 0$ 时,即只引入有功功率高频分量控制时,在 2 s 时有功指令突变,相比只引入角频率高频分量控制,引入有功功率高频分量控制时有功功率振荡得到一定程度的抑制,有功超调降低为 4 kW,达到稳态时间减小为 0.5 s,在 4 s 时电网频率突变,此时有功稳态误差依然约为 5.5 kW。当采用所提控制方法时,根据图 11 可知,此时有功振荡基本不存在, VSG 输出有功功率能够平滑过渡,并且相比其他 3 种方法,稳态误差下降更加明显,仅为 2.7 kW。仿真结

果表明,所提控制方法能够更好地抑制 VSG 的有功功率振荡。

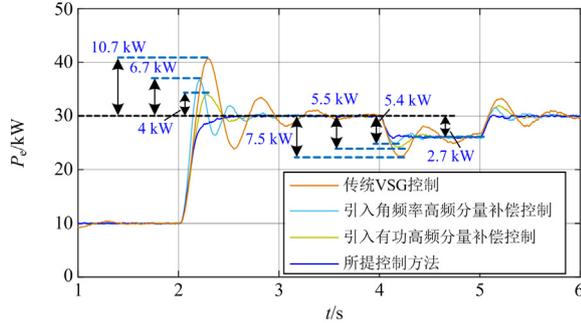


图 13 不同控制策略时有功功率仿真结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation results of active power under different control strategies

当采用传统 VSG 控制时,输出电流波形如图 14 所示。在有功指令和电网频率突变时 VSG 输出电流振荡明显。当引入角频率高频分量补偿控制时,输出电流波形如图 15 所示,此时 VSG 输出电流依然存在较大的振荡,相比图 14,振荡幅值有所降低。当引入有功功率高频分量补偿控制时,输出电流波形如图 16 所示。相比图 14 和图 15,此时 VSG 输出电流振荡有所衰减,但是在有功指令突变和电网频率突变时,依然能观察到 VSG 输出电流振荡现象。当采用本文所提控制策略时,输出电流波形如图 17 所示,在有功指令突变和电网频率突变的情况

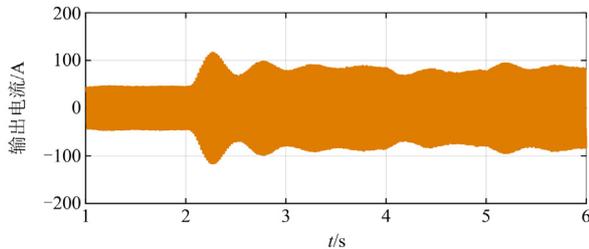


图 14 传统 VSG 控制时输出电流仿真结果

Fig. 14 Simulation result of output current under traditional VSG control strategy

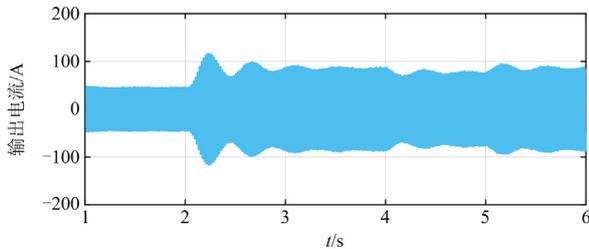


图 15 引入角频率高频分量补偿控制时输出电流仿真结果

Fig. 15 Simulation result of output current when the high-frequency component of angular frequency is introduced

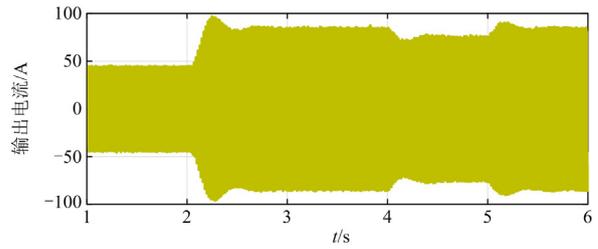


图 16 引入有功高频分量补偿控制时输出电流仿真结果

Fig. 16 Simulation result of output current when the high-frequency component of active power is introduced

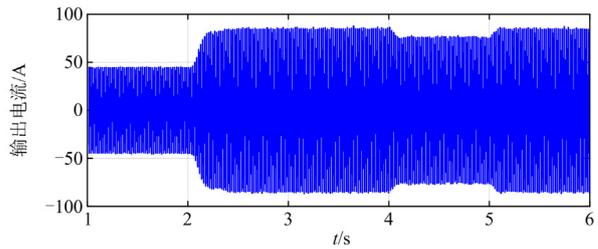


图 17 采用所提控制方法时输出电流仿真结果

Fig. 17 Simulation result of output current when the proposed control method is used

下, VSG 输出电流均能平滑过渡到稳态,基本不存在振荡和超调的问题。因此,仿真结果进一步表明了本文所提控制方法能更好地抑制有功功率振荡。

4.3 验证所提控制策略对电网电感变化的鲁棒性

为验证本文所提控制策略对电网电感变化的鲁棒性,在相同控制参数下,考虑不同电网电情况,仿真结果如图 18 所示。

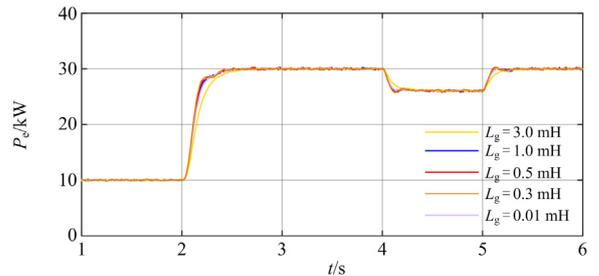


图 18 所提控制策略下不同 L_g 的仿真结果

Fig. 18 Simulation results when using the proposed control strategy under different L_g

图 18 的仿真结果表明,当电网电感 L_g 采用不同值时,所提控制方法依然能很好地抑制有功功率振荡,因此所提控制策略适用于不同电网强度。

5 实验验证

为了进一步验证所提控制方法的有效性,搭建了以 DSP28335 核心控制器的 VSG 并网实验平台。

本文采用电网模拟器 Chroma 61845 模拟电网, VSG 直流侧电压由直流电压源提供, VSG 的开关频率为 10 kHz。其他实验参数同仿真参数, 如表 1 所示。在实验中, 考虑到实验室现有硬件主电路过流能力, 有功指令值和突变后指令值均比仿真中的数值要小, 即在小功率 VSG 并网平台上进行实验验证。实验工况为: VSG 有功指令值先突变, 然后电网模拟器频率从 50 Hz 突变为 50.5 Hz, 再之后电网模拟器频率从 50.5 Hz 又突变为 50 Hz。

当传统 VSG 控制时 VSG 输出电流实验波形如图 19 所示。在有功指令和电网频率突变时 VSG 输出电流会发生明显的振荡现象。

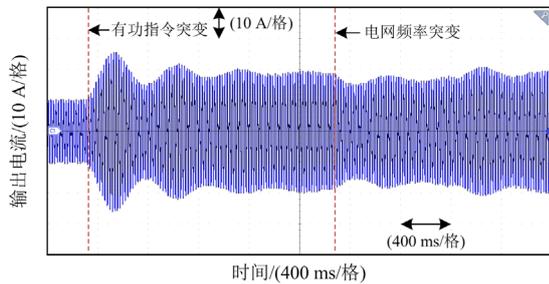


图 19 传统 VSG 控制时输出电流实验结果

Fig. 19 Experimental result of output current under traditional VSG control strategy

当引入角频率高频分量补偿控制时输出电流实验结果如图 20 所示, 可以看出 VSG 输出电流依然存在较为明显的振荡现象, 只是相比图 19, 此时 VSG 输出电流振荡得到了轻微抑制。

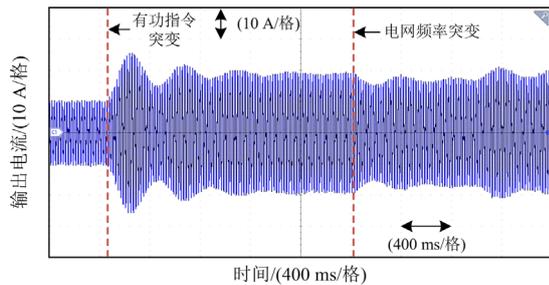


图 20 引入角频率高频分量补偿控制时输出电流实验结果

Fig. 20 Experimental result of output current when the high-frequency component of angular frequency is introduced

当引入有功功率高频分量补偿控制时 VSG 输出电流实验波形如图 21 所示。由图 21 可知, 相比图 19 和图 20, 当引入有功高频分量补偿控制时, VSG 输出电流振荡得到较大幅度的抑制, 并且在遭受有功指令突变或电网频率突变等外界扰动时, 达到稳态的时间缩短。但是在遭受扰动瞬间, VSG 输出电流依然存在较为明显的振荡和超调。

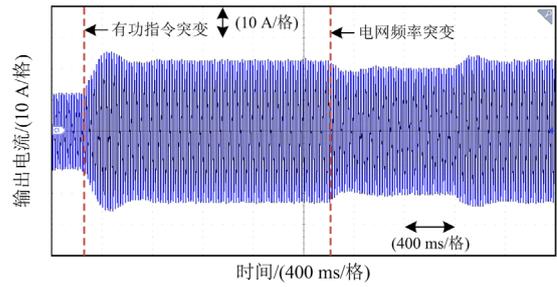


图 21 引入有功高频分量补偿控制时输出电流实验结果

Fig. 21 Experimental result of output current when the high-frequency component of active power is introduced

当采用所提控制策略时 VSG 输出电流实验波形如图 22 所示。在所提控制方法作用下, VSG 输出电流基本不存在振荡和超调的问题。在遭受有功指令突变和电网频率突变扰动时, VSG 输出电流能够平滑且快速地过渡到稳态。因此, 本文所提控制策略能很好地抑制有功指令突变和电网频率突变时 VSG 输出有功功率振荡。

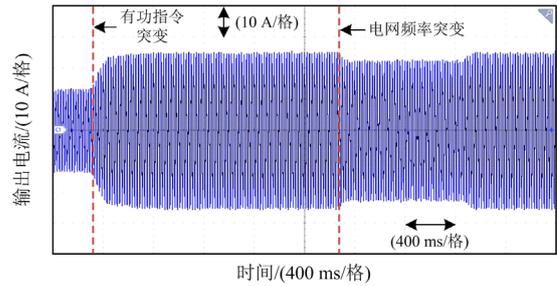


图 22 采用所提控制策略时输出电流实验结果

Fig. 22 Experimental result of output current when the proposed control method is used

6 结论

本文针对传统虚拟同步发电机并网运行时输出有功功率动态和稳态特性存在调节矛盾的问题, 从状态反馈极点配置角度出发, 提出了基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略, 得到如下结论。

1) 传统的固定阻尼系数控制方法无法兼顾 VSG 并网运行输出有功的振荡抑制和稳态偏差, 阻尼系数越大抑制效果越好, 但是会带来更大的稳态误差。

2) 通过选取关键量作为状态变量, 借助状态反馈控制理论中极点配置思想, 分析了所提暂态阻尼增强的改进型 VSG 控制的物理意义, 即可通过角频率高频分量补偿控制结合有功功率高频分量补偿控制, 实现 VSG 的极点配置, 从而增强系统阻尼, 抑制有功功率振荡, 并且不影响系统的稳态特性。

3) 通过建立所提控制策略的有功控制闭环小信号模型, 结合特征根的根轨迹分析方法, 指导状态反馈参数的设计。仿真和实验结果表明, 所提控制方法相比固定阻尼策略、角频率高频分量补偿控制策略、有功功率高频分量补偿控制策略具有更好的功率振荡抑制效果。

参考文献

- [1] 倪泽龙, 林钰钧, 王治涛, 等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 85-93.
NI Zelong, LIN Yujun, WANG Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93.
- [2] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [3] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.
- [4] 杭丽君, 闫东, 胡家兵, 等. 电力电子系统建模关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 2966-2980.
HANG Lijun, YAN Dong, HU Jiabing, et al. Review and prospect of key modeling technologies for power electronics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2966-2980.
- [5] ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines: a unified interface for grid integration[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2016, 3(4): 18-27.
- [6] GUO Leilei, XU Zhiye, JIN Nan, et al. A weighted voltage model predictive control method for a virtual synchronous generator with enhanced parameter robustness[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 482-492.
- [7] 郭小龙, 张江飞, 亢朋朋, 等. 含基于PI控制受端二次调频的特高压直流虚拟同步控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 66-72.
GUO Xiaolong, ZHANG Jiangfei, KANG Pengpeng, et al. Virtual synchronization control strategy for UHVDC with secondary frequency modulation based on PI control[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 66-72.
- [8] 王光宇, 付立军, 胡祺, 等. 计及电压环影响的虚拟同步发电机低频振荡阻尼分析与控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 177-184.
WANG Guangyu, FU Lijun, HU Qi, et al. Analysis and control of low-frequency oscillation damping of virtual synchronous generator considering influence of voltage loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 177-184.
- [9] 马燕峰, 郑力文, 霍亚欣, 等. 虚拟同步发电机接入电力系统的阻尼转矩分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 166-171.
MA Yanfeng, ZHENG Liwen, HUO Yaxin, et al. Damping torque analysis of virtual synchronous generator connected to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 166-171.
- [10] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893.
WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893.
- [11] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 131-141.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. Transient power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator considering overshoot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 131-141.
- [12] 曾四鸣, 梁纪峰, 马燕峰, 等. VSG 附加自抗扰阻尼控制抑制低频振荡研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 27-34.
ZENG Siming, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Research on VSG additional active disturbance rejection damping control to suppress low frequency oscillations[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 27-34.
- [13] 许崇福, 李菀茹, 徐宁一, 等. 应用于储能变流器的虚拟同步发电机阻尼特性分析与改进[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1656-1665.
XU Chongfu, LI Wanru, XU Ningyi, et al. Analysis and improvement of damping characteristics of virtual synchronous generator control applied to energy storage converter[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1656-1665.
- [14] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学

- 报, 2016, 36(21): 5724-5731.
- CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on parameter adaptive regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731.
- [15] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1830-1838.
- [16] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia[C] // Proceedings of the 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 15-19, 2013, Denver, Colorado, USA.
- [17] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [18] 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.
- [19] DONG Shuan, YU C. Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 608-619.
- [20] ASHABANI M, MOHAMED Y A I. Integrating VSCs to weak grids by nonlinear power damping controller with self-synchronization capability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 805-814.
- [21] 李美依, 黄文焘, 邵能灵, 等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1525-1533.
- LI Meiyi, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Adaptive inertial control strategy for inverter interfaced distributed generator based on virtual synchronous generator under frequency disturbances[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1525-1533.
- [22] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 394-395.
- [23] LIU Jia, YUSHI M, HASSAN B, et al. A unified modeling method of virtual synchronous generator for multi-operation-mode analyses[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 2394-2409.
- [24] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于微分补偿环节虚拟惯性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 96-102.
- XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on differential compensation virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 96-102.
- [25] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的 VSG 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1918-1926.
- XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1926.
- [26] 陈昕, 张昌华, 黄琦. 引入功率微分项下垂控制的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 46-53.
- CHEN Xin, ZHANG Changhua, HUANG Qi. Small-signal stability analysis of microgrid using droop control with power differential term[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 46-53.
- [27] 李明烜, 王跃, 徐宁一, 等. 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2176-2185.
- LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.
- [28] 高子轩, 赵晋斌, 杨旭红, 等. 基于 RBF 的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 132-139.
- GAO Zixuan, ZHAO Jinbin, YANG Xuhong, et al. RBF-based adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 132-139.
- [29] XIONG Xiaoling, WU Chao, HU Bin, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7820-7831.

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-08-09

作者简介:

江世明(1965—), 男, 本科, 副教授, 研究方向为嵌入式电力电子控制技术; E-mail: 75363430@qq.com

唐杰(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子变换与控制技术。E-mail: 706648502@qq.com

(编辑 张颖)