

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210775

基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制

于晶荣¹, 孙文¹, 于佳琪², 王益硕¹

(1. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙学院电子信息与电气工程学院, 湖南 长沙 410022)

摘要: 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制方法下的并网逆变器(Grid-Connected Inverter, GCI)在电网工况突变情况下存在输出功率和频率的超调和振荡现象。为改善 GCI 的动态性能, 提出一种基于惯性自适应的 VSG 控制方法。该方法直接对采用 VSG 控制方法的 GCI 的功角曲线和输出特性曲线进行分析, 推导出 GCI 的输出功率和频率变化率之间的关系。通过利用 GCI 虚拟输出功率和参考功率的偏差判断系统的四个加减速运行区间, 避免对输出频率变化率的依赖。构造惯性自适应控制算法, 通过参数的连续平滑调节, 抑制 GCI 的输出功率和频率的波动。与现有方法相比, 该方法不需要对频率直接微分, 避免引入系统噪声; 同时惯性参数能够连续调节, 且变化范围更大。仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 并网逆变器; 虚拟同步发电机; 输出动态特性; 加减速运行区间; 惯性自适应; 虚拟输出功率

Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia

YU Jingrong¹, SUN Wen¹, YU Jiaqi², WANG Yishuo¹

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: A grid-connected inverter (GCI) based on a virtual synchronous generator (VSG) control may cause overshoot or oscillation of output power and frequency under fluctuation conditions. A VSG control method based on an inertial adaptive algorithm is proposed to improve the dynamic performance of a GCI. This method directly analyzes the power angle and output characteristic curves of a GCI based on VSG control, and deduces the relationship between the output power and the frequency change rate. By judging the four acceleration and deceleration operation intervals of the inverter, the deviation between the virtual output active power and reference power is employed to avoid dependence on the change rate of the output frequency. With an adaptive control algorithm, the parameters can be adjusted continuously and smoothly, so that the frequency and output power fluctuations of the GCI can be restrained. Compared with existing methods, the proposed method does not require frequency differentiation directly. This avoids the introduction of system noise. It can also achieve a wider range of continuous adjustment of inertial parameters. Simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2017JJ2348).

Key words: grid-connected inverter; virtual synchronous generator; output dynamic characteristic; acceleration and deceleration interval; inertial adaptive; virtual active power

0 引言

以并网逆变器(Grid-Connected Inverter, GCI)为接口的太阳能、风能等可再生能源发电系统, 由于不具备传统发电机组的惯量和阻尼特性以及输出功率具有间歇性和不确定性, 其大量并网严重影响了

电网的稳定运行^[1-3]。改变 GCI 的控制方式, 例如采用虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制技术, 能够使可再生能源发电系统具有阻尼和惯性特性, 大大提升系统输出功率和频率的抗扰能力^[4-6]。

系统的等效惯性可用于衡量系统的动态响应, 若等效惯性小, GCI 动态响应速度快, 但频率波动大, 不利于系统稳定运行; 若等效惯性大, 会使得

基金项目: 湖南省自然科学基金项目资助(2017JJ2348)

系统动态过程中输出功率超调高, 振荡增加, 动态恢复缓慢^[7-8]。而惯性系数的在线调整, 是优化 GCI 输出动态响应的有效方法^[9-10]。根据 VSG 控制的数学模型, 需要通过 GCI 的输出频率偏差和频率变化率划分系统的四个加减速运行区间以确定惯性自适应原则, 因此在控制结构中直接引入频率微分项的惯性自适应算法被广泛研究^[11-18]。

文献[11]采用系统瞬态能量分析方法, 论证了合理地交替配置惯性可抑制 GCI 输出功率和频率的振荡。文献[12]结合同步发电机的功角曲线和转子惯量的物理意义, 提出了一种基于虚拟转子惯量自适应变化的 VSG 控制方法, 改善了 GCI 的动态性能。文献[13]分析了阻尼、惯性系数和调差系数对系统动态响应的影响, 提出了一种基于转动惯量和阻尼系数协调自适应的 VSG 控制策略, 改善了 GCI 的输出动态响应。文献[14]分析了自适应旋转惯量对系统频率的影响, 提出了一种应用于光储微网系统的基于旋转惯量自适应的 VSG 控制策略, 明显抑制了负荷扰动下系统输出频率和输出功率的波动。文献[15]根据系统角频率变化率和角频率偏差的变化规律, 重新设计模糊规则以调节 VSG 的虚拟惯量, 合理地抑制了瞬态过程中系统频率和功率的波动。基于这一类惯性自适应算法的 VSG 控制, 都是直接利用 GCI 的输出频率微分项构建函数来进行惯性系数的自适应选取, 然而, 在频率变化剧烈的情况下, 这类方法将放大噪声、恶化功率环的输出特性。

为了避免直接引入输出频率微分项带来的不利影响, 相关学者提出了改进型控制结构以提升系统性能。文献[16]分析了参数设计和时域动态特性的关系, 提出了基于惯性自适应的新型 VSG 控制方案, 在有功控制中增加一阶延迟环节, 从而扩大了参数变化范围, 但无可避免地引入了一个系统极点, 因此在参数设计中势必要考虑系统阶数增加的影响。而在文献[17]和文献[18]中, 作者将调节系数、频率偏差与频率变化率的乘积代入摆动方程求解频率变化率, 避免由频率直接微分而引入的噪声, 并根据方程的解析式直接搭建控制结构, 实现 GCI 的惯性自适应调整。但该方法需考虑解存在的边界条件, 因此会约束惯性的自适应调节范围。

为了克服上述方案的不足, 本文分析 VSG 控制方法下 GCI 的功角曲线和功频变化曲线, 提出一种基于惯性自适应的 VSG 控制方法, 主要贡献点包括:

1) 构造虚拟输出功率, 给出虚拟输出功率和参考功率的偏差与频率变化率之间的对应关系, 为惯性自适应设计提供了新的视角;

2) 提出惯性自适应算法, 采用虚拟输出功率和

参考功率的偏差替换频率变化率, 避免传统惯性自适应算法中频率直接微分而引入的系统噪声;

3) 构造基于惯性自适应的 VSG 控制, 该控制根据系统的四个加减速运行区间, 在不增加系统阶数的前提下, 平滑连续地调节 GCI 的惯性, 改善 GCI 的输出动态特性。

另外, 本文采用李雅普诺夫定理论证所提方法的稳定性, 并推导出本文所提控制方法下 GCI 的稳定运行裕度; 最后通过仿真验证所提方法的可行性。

1 单相 GCI 及其 VSG 控制

本文以单相 GCI 为研究对象, 其拓扑结构如图 1 所示。其采用典型的 GCI 拓扑结构。其中, V_{dc} 为直流侧电压; C_{dc} 为直流侧电容; L_f 、 R_f 和 C_f 分别为滤波电感、电阻和电容; V_g 、 Z_{g1} 和 Z_{g2} 分别为电网电压和电网侧等效阻抗; K_1 、 K_2 和 K_3 为线路开关, Z_{load} 为本地负荷。

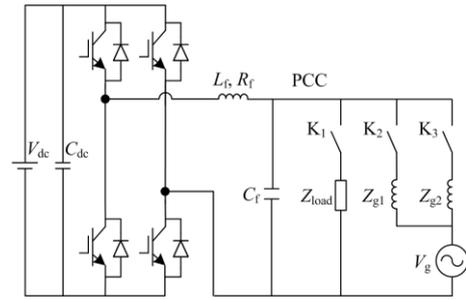


图 1 单相 GCI 拓扑结构

Fig. 1 Single-phase GCI topology

VSG 控制考虑模仿同步发电机有功调频和无功调压特性, 将 GCI 控制成一个幅值和频率可调的电压源并入电网中。GCI 等效并网电路模型如图 2 所示, 其中, 公共母线处的电压为 V_{pcc} , GCI 输出电压和电网电压分别为 V 和 V_g ; GCI 等效输出阻抗为 Z_{vsc} ; 电网阻抗为 $Z_g = R + jX_g$ 。

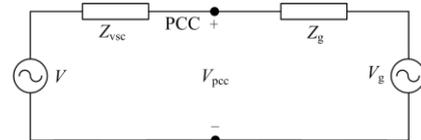


图 2 GCI 等效并网电路模型

Fig. 2 GCI equivalent grid-connected circuit model

设图 2 中 GCI 输出频率和电网频率分别为 ω 和 ω_g ; GCI 输出电压和电网电压的相位角分别为 δ_1 和 δ_g ; δ 是两者之间的角度偏差, 称为功角, 即

$$\delta = \delta_1 - \delta_g = \int (\omega - \omega_g) dt \quad (1)$$

本文假定电网阻抗为高感性(即 $Z_g = jX_g$), 或

可通过虚拟阻抗控制策略^[19-20]配置 Z_{vsc} 来实现该假设, 因此 GCI 的有功输出功率 P 和无功输出功率 Q 可表示为

$$S = P + jQ = \frac{V_g V}{X} \sin \delta + j \frac{V^2 - V V_g \cos \delta}{X} \quad (2)$$

基于式(2), GCI 的 VSG 控制方法通常采用功率外环控制给定参考电压, 以及电压电流双内环控制实现参考电压的快速跟踪, 控制框图如图 3 所示。

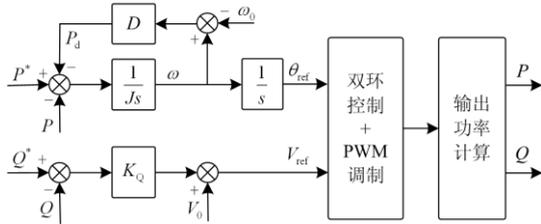


图 3 VSG 控制结构框图

Fig. 3 VSG control structure block diagram

图 3 中, Q^* 为参考无功功率; Q 为 GCI 实际输出无功功率; K_Q 为无功环比例系数; V_0 为 GCI 额定输出电压幅值; P^* 为参考有功功率; P_d 为摩擦功率, 是发电机中机械摩擦、定子损耗和阻尼绕组形成的机械转矩的等效功率, 因此 P_d 的值由 GCI 输出频率 ω 和额定频率 ω_0 的差值与阻尼系数 D 相乘得到(即 $P_d = D(\omega - \omega_0)$); P 为 GCI 实际输出有功功率; J 为虚拟惯性系数; D 为阻尼系数; V_{ref} 为电压环参考电压的幅值, 由无功环给定; θ_{ref} 为电压环参考电压的相角, 由有功环给定。

GCI 的 VSG 控制一般通过在有功-频率控制中引入惯性系数和阻尼系数来模拟同步电机的摆动方程, 实现调频特性, 其数学表达式为

$$\begin{cases} P^* - D(\omega - \omega_0) - P = J\dot{\omega} \\ P_{ref} = P + D(\omega - \omega_0) = P + P_d \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 P_{ref} 为 GCI 的虚拟输出功率, 其等效为同步发电机实际应当输出的有功功率, 因此其等于 GCI 实际输出功率和摩擦功率两部分之和。此外, 参考频率 ω_0 通常设定为电网额定运行频率 ω_g , 一般设置为 50 Hz。

本文着重探讨基于惯性自适应的 VSG 控制方法, 因此主要研究 GCI 的有功-频率控制。而对于无功环则采取常用的比例控制, 因此不再详细阐述。

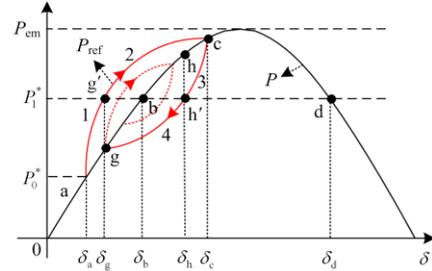
2 基于惯性自适应的 VSG 控制方法

本节首先分析 GCI 输出功率和频率之间的关系, 根据机理分析提出一种惯性自适应算法, 并给出基于该算法的 VSG 控制方法下的 GCI 的有功-频

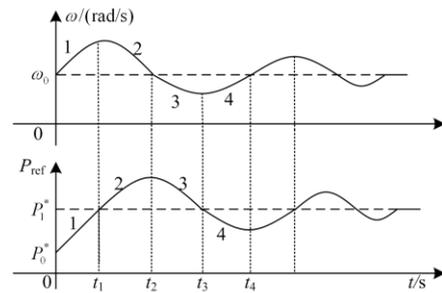
率控制结构。

2.1 惯性自适应调整机理

VSG 控制下的 GCI 功角曲线、虚拟输出功率以及输出频率振荡曲线如图 4 所示。



(a) GCI 功角曲线



(b) GCI 输出特征曲线

图 4 GCI 动态特性曲线

Fig. 4 GCI dynamic characteristic curve

由图 4(a)可知, 当 GCI 的参考有功功率从 P_0^* 增加到 P_1^* 时, 系统稳定运行点从 a 点切换到 b 点, 其动态过程表现为在 a 点和 c 点之间衰减振荡, 最后稳定运行于 b 点。根据图 4(b), 输出频率和虚拟输出功率的动态过程可以分为四个区间:

(1) $0 \sim t_1$ 期间系统加速, 此区间内 GCI 的虚拟输出功率和实际输出功率一直在跟踪参考功率, 由于阻尼的存在, 系统提前在 g 点完成加速。系统在 g 点运行时, 虽然实际输出功率仍然小于参考功率, 但是虚拟输出功率实现跟踪, 且输出频率达到了最大值, 系统开始减速。

因此加速区间 1 内系统工作点从 a 点到 g 点, 这一阶段内输出频率在远离参考频率, 虚拟输出功率在追踪参考功率, 且有 $d\omega/dt > 0$, $P_1^* - P_{ref} > 0$ 。此阶段期望输出频率变化缓慢, 频率偏差小, 考虑增大系统惯性。

(2) $t_1 \sim t_2$ 期间系统减速, 系统在 g 点运行时功率达到平衡, 频率偏差达到最大值, 系统由于惯性作用会继续向 c 点运行, 系统运行到 c 点时, 频率偏差为 0, GCI 的虚拟输出功率和实际输出功率响应曲线会重合在 c 点。过 c 点后, 系统虽然继续减

速, 但频率偏差开始反向, 输出频率开始远离参考频率。

因此减速区间 2 内系统工作点从 g 点到 c 点, 这一阶段输出频率始终处于回归状态, 且有 $d\omega/dt < 0$ 、 $P_1^* - P_{ref} < 0$ 。此阶段期望加快频率的回归, 因此应减小系统惯性, 即等效于减轻转子质量, 显然对于同样的角速度偏差, 需要缓冲的能量减少, c 点的位置会左移, 减速区间 2 缩小, 实现加快频率跟踪和降低功率的超调。

减速区间 3 和加速区间 4 的过程分析与前两阶段类似, 不再赘述。

2.2 基于惯性自适应的 VSG 控制

依据 2.1 节分析, 惯性自适应原则如表 1 所示。

表 1 惯性系数的选取原则

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	ΔP	$\Delta P\Delta\omega$	J
1	>0	>0	>0	>0	增加
2	>0	<0	<0	<0	减小
3	<0	<0	<0	>0	增加
4	<0	>0	>0	<0	减小

表中, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 表示 GCI 输出频率与额定频率之间的偏差, ΔP 为 GCI 参考有功功率与虚拟有功输出功率之间的偏差, 有

$$\Delta P = P^* - P_{ref} = P^* - D(\omega - \omega_0) - P \quad (4)$$

根据上述分析, ΔP 始终与频率变化率 $d\omega/dt$ 同号。因此, 可利用功率偏差替代频率变化率对 GCI 系统的四个加减速区间进行分区, 设计惯性自适应控制算法如式(5)。

$$J = J_0 + H\Delta P\Delta\omega \quad (5)$$

式中: J_0 为初始惯性系数; H 为惯性调节系数, 始终为正。将式(5)代入式(3)可得

$$\dot{\omega} = \frac{P^* - P - D(\omega - \omega_0)}{(J_0 + H(P^* - P - D(\omega - \omega_0))(\omega - \omega_0))} \quad (6)$$

依据上式, 本文所提出的惯性自适应控制方法的有功控制框图如图 5 所示。

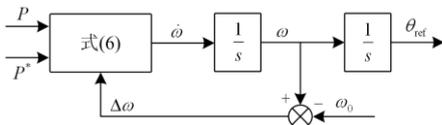


图 5 基于自适应惯性的有功控制框图

Fig. 5 Block diagram of active power control based on adaptive inertia

该方法用 GCI 的功率偏差进行惯性系数的自适应选取, 能够避免对频率直接求导; 且该方法可根据系统的四个加减速运行区间自适应地调整惯性,

保证惯性变化平滑连续。当调节系数 H 为 0 时, 即为一般的常惯性系数 VSG 控制。

另外, 与文献[17]提出的惯性自适应控制算法(见附录 A)相比, 本文提出的方法计算简便, 无需进行根号计算, 并且不需要考虑求解条件对惯性变化范围产生约束, 惯性的可调整范围相对更大。

3 稳定性分析和参数设计

3.1 基于李亚普洛夫定理的稳定性分析

为论证本文提出的基于惯性自适应的 VSG 控制方法的稳定性, 改写式(6)为

$$P^* - P - D(\omega - \omega^*) = (J_0 + H\Delta P\Delta\omega)\dot{\omega} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 新构造的自适应惯性具有典型的非线性特征, 可利用李雅普诺夫定理从能量函数的角度对其稳定性进行分析。联立式(1)、式(2)和式(7)可得

$$A\sin\delta_0 - A\sin\delta - D\dot{\delta} = (J_0 + H\dot{\delta}(A\sin\delta_0 - A\sin\delta - D\dot{\delta}))\dot{\delta} \quad (8)$$

式中, $(A, \delta_0) = (V_g V / X_g, \arcsin \theta(P^* X / V_g V))$ 。

首先选取状态变量: $(x_1, x_2) = (\delta - \delta_0, \omega - \omega_0)$, 并将式(8)描述为状态空间模型。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ J_0 \dot{x}_2 + H((A\sin\delta_0 - A\sin(x_1 + \delta_0) - Dx_2)x_2)\dot{x}_2 = \\ A\sin\delta_0 - A\sin(x_1 + \delta_0) - Dx_2 \end{cases} \quad (9)$$

在式(9)两边同时乘以状态变量 x_2 , 得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 x_2 = x_2 x_2 \\ J_0 \dot{x}_2 x_2 + (A\sin(x_1 + \delta_0) - A\sin(\delta_0))x_2 = \\ -Dx_2^2 - H(A\sin\delta_0 - A\sin(x_1 + \delta_0) - Dx_2)\dot{x}_2 x_2^2 \end{cases} \quad (10)$$

由此构建李雅普诺夫函数为

$$V(x) = \frac{1}{2} J_0 x_2^2 + \int_0^{x_1} (A\sin(x + \delta_0) - A\sin\delta_0) dx \quad (11)$$

系统初始惯性为正, 因此在 $x_1 \in (-\pi, \pi - 2\delta_0)$ 区间内满足 $V(x) > 0$, 且有

$$\dot{V}(x) = -Dx_2^2 - H(A\sin\delta_0 - A\sin(x_1 + \delta_0) - Dx_2)\dot{x}_2 x_2^2 \quad (12)$$

根据表 1, 功率偏差和频率变化率始终同号且调节系数 H 为正, 则有

$$H(A\sin\delta_0 - A\sin(x_1 + \delta_0) - Dx_2)\dot{x}_2 \geq 0 \quad (13)$$

因此有 $\dot{V}(x) < 0$, 那么基于本文所提方法运行的 GCI 的功角稳定裕度为 $(-\pi + \delta_0, \pi - \delta_0)$ 。同时可发现, 当初始惯性系数和阻尼系数为正时, 本文提出的控制方法相当于引入一个正向阻尼项, 从而加速能量的衰减过程, 大大提升系统稳定性^[21]。因此本

文所提方法可提升 GCI 的稳定运行能力。

3.2 惯性调节系数的设计

根据文献[22]和文献[23], VSG 控制下的 GCI 为一个典型的二阶系统, 因此有

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{A/J_0} \\ \xi = 0.5D\sqrt{1/J_0A} \end{cases} \quad (14)$$

此外, 考虑离网情况下功率偏差导致频率所允许的最大偏差, 有

$$(P^* - P)_{\max} / D \leq |\Delta\omega_{\max}| \quad (15)$$

因此由式(14)和式(15), 本文的有功控制参数可以根据最优二阶系统设计准则给定。首先参考同步发电机的自然振荡频率(0.628~4.572 rad/s), 选取二阶系统的振荡频率 ω_n 为 2.50 rad/s, 从而设置初始惯性系数 J_0 为 20; 类似地, 综合考虑系统超调和频率偏差阈值, 确定二阶系统的阻尼比 ξ 为 0.48, 从而设置初始阻尼系数 D 为 200; 而无功环采取一般的比例控制, 设置比例系数 K_Q 为 0.001。

注意, 在惯性自适应变化的过程中惯量必须始终为正, 否则系统呈现的负惯性将导致加减速模式的切换, 从而影响系统的稳定性^[24], 则约束条件为

$$J = J_0 + H((P^* - P - D(\omega - \omega_0))(\omega - \omega_0)) \geq 0 \quad (16)$$

即满足 $J_0 \geq H |\Delta\omega\Delta P|_{\max}$ 。

通常 GCI 输出功率和频率的超调不会超过初始偏差, 且虚拟输出功率和输出频率呈衰减振荡, 所以对于图 4(b)中的动态过程来说, 功率偏差在区间 1 最大, 则 $|\Delta P\Delta\omega|$ 的最大值会出现在区间 1 中, 且该值为正。同时, 式(16)的中间项的第二项为一元二次凸函数, 因此具有最大值, 整理可得

$$F = H\left(-(\Delta\omega - \frac{P^* - P}{2D})^2 + \frac{(P^* - P)^2}{4D}\right) \quad (17)$$

为避免算法病态问题, 调节系数 H 应满足

$$H \leq \frac{4J_0D}{(P^* - P)_{\max}^2} \quad (18)$$

其中, $(P^* - P)_{\max}$ 表示参考功率和实际输出功率偏差取最大值, 此外, 当进行限幅设置避免系统呈现负惯性时, 可以增大调节系数 H 来扩大 GCI 惯性的调整范围。

4 仿真结果与分析

为验证前述理论分析及所提控制方法的正确性及有效性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建 VSG 控制方法下的 GCI 仿真模型, 在两种不同算例下进行了分析。算例中只调整惯性调节参数 H 的取值, 本文选取的仿真参数保持不变, 如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

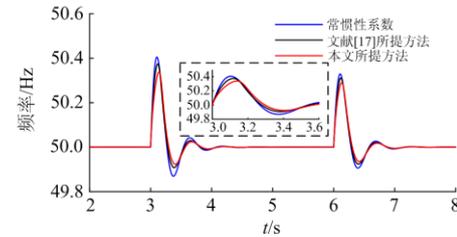
参数名称	符号/单位	参数值
滤波电容	$C_f / \mu\text{F}$	33
滤波电感	L_f / mH	2
滤波电阻	R_f / Ω	0.1
直流侧电容	$C_{dc} / \mu\text{F}$	9 600
直流侧电压	U_{dc} / V	130
交流侧额定电压	U_N / V	100
网侧线路阻抗 1	$L_{g1}, L_{g2} / \text{mH}$	8.8
初始惯性系数	J_0	20
阻尼系数	D	200
无功比例系数	K_Q	0.001

4.1 算例 1——参考功率发生阶跃变化

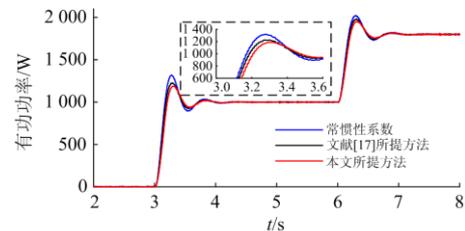
为模拟参考功率突变, 系统与电网同步后, 在 3 s 时刻将参考有功功率从 0 W 阶跃至 1 000 W, 当系统再次进入稳态后将参考有功功率从 1 000 W 阶跃至 1 800 W。

本文在算例 1 中对本文所提方法、文献[17]所提方法和常惯性系数方法进行了仿真对比。当不进行限幅设置时, 本文所提方法和文献[17]所提方法需考虑出现负惯性导致算法失效的问题, 因此分别根据式(18)和式(20)选取惯性调节系数。已知初始控制参数 J_0 、 D 和有功功率的最大阶跃值为 1 000 W, 则分别取 H 和 k 的最大边界值为 0.016 和 0.08。图 6 给出了不同控制方法下的 GCI 的仿真结果。

图 6 中, 参考功率发生了两次阶跃变化, 对于常惯性系数控制, GCI 的惯性恒定为 20, 此时 GCI 的输出功率和输出频率均存在较高的超调。而动态



(a) GCI 输出频率



(b) GCI 输出功率

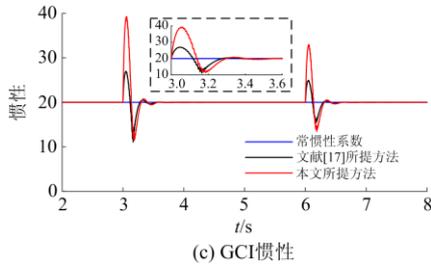


图 6 功率阶跃下基于不同方案的仿真结果

Fig. 6 Simulation results based on different schemes under power step change

过程中, 文献[17]和本文所提方法均能够保证 GCI 的惯性连续地自适应调整, 从而降低输出功率和频率的超调。图 6 中虚线框内为横坐标放大的缩影图, 其中不同方法的仿真结果数据对比如表 3 所示(仿真时间 3~3.6 s)。

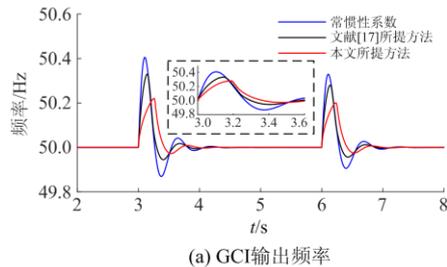
表 3 在小惯性变化范围情况下的指标对比

Table 3 Comparison of results in the case of small inertia range

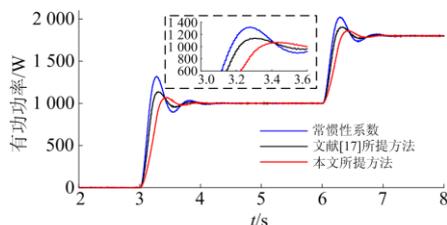
控制方法	惯性变化范围	有功功率超调	频率最大偏差/Hz
常惯性系数	恒定 20	32%	0.4
文献[17]方法	(11~26)	22%	0.38
本文所提方法	(11~39)	17%	0.34

由表 3 和图 6 中缩影图可知, 在避免算法失效而均取一个保守的惯性调节系数的前提下, 与文献[17]所提方法相比, 本文所提控制方法能够实现惯性调节范围更大且有功功率和频率的超调更小, 因此能够进一步改善 GCI 的输出动态响应特性。

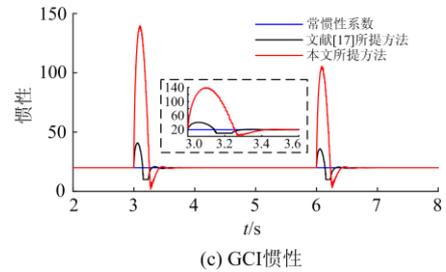
当考虑进行限幅设置并同时增大 11.5 倍惯性调节系数, 即设定 H 和 k 分别为 0.2 和 1 时, 仿真结果如图 7 所示。



(a) GCI输出频率



(b) GCI输出功率



(c) GCI惯性

图 7 考虑调节系数增大后的仿真结果

Fig. 7 Simulation results considering the adjustment coefficient increases

图 7 验证了前文理论分析的正确性; 当增大惯性调节系数时, 文献[17]和本文所提方法均实现了惯性变化范围的扩大, 从而进一步降低了 GCI 输出功率和输出频率的超调。图 7 中虚线框内为横坐标放大的缩影图, 其中不同方法的仿真结果数据对比如表 4 所示(仿真时间 3~3.6 s)。

表 4 在大惯性变化范围情况下的指标对比

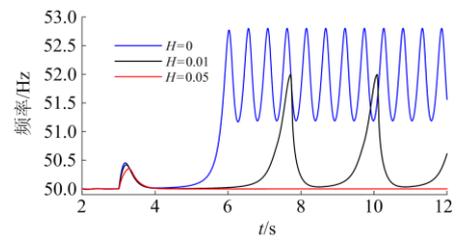
Table 4 Comparison of results in the case of large inertia range

控制方法	惯性变化范围	有功功率超调	频率最大偏差/Hz
常惯性系数	恒定 20	32%	0.4
文献[17]方法	(10~40)	13%	0.33
本文所提方法	(2~139)	7%	0.21

由表 4 和图 7 中缩影图可知, 当同时增大 11.5 倍惯性调节系数时, 基于文献[17]所提方法的 GCI 的惯性始终存在着一个最低值 10 的约束, 与之相比, 本文所提方法可实现的惯性范围更大, 有功功率超调和频率最大偏差更小, 更好地改善了 GCI 输出动态响应特性。

4.2 算例 2——电网侧阻抗改变

为验证本文所提方法对改善 GCI 运行稳定性的效果, 在电网发生大扰动的情况下, 设定不同的惯性调节系数 H , 对本文所提方法进行了仿真分析。为模拟大扰动工况, 在 4 s 时刻断开开关 K_2 , 使得电网阻抗瞬间增大。图 8 为设定不同的 H 值时的 GCI 输出特性曲线。



(a) GCI输出频率

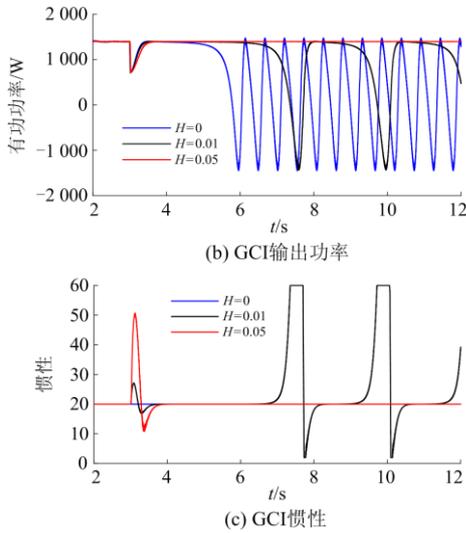


图8 电网侧阻抗突变下不同控制方案仿真结果

Fig. 8 Simulation results of different control schemes under sudden change of power network impedance

由图8可知,当 H 设置为0时,相当于常惯性系数,且系统惯性为20,当网侧阻抗突然增加时,GCI运行失稳;当 H 设置为0.01时,GCI惯性实现了自适应调节且输出特性得到改进,但仍然存在输出失稳;当 H 设置为0.05,惯性变化范围扩大,VSG输出经历振荡后达到稳态。因此,当网侧阻抗改变时,本文所提方法可以改善系统输出动态特性,且具有提升GCI运行稳定性的能力,且调节系数 H 越大,GCI运行的稳定性越好。

5 结论

针对VSG控制方法下GCI动态过程中的超调和振荡问题,本文分析总结了基于功率偏差的惯性自适应机理,在不直接引入频率微分的前提下提出了惯性自适应控制算法,并构造了基于惯性自适应的VSG控制方法。该方法能够通过平滑连续的调整GCI的惯性来降低电网工况突变下的GCI输出功率和频率的超调。

此外,该方法可提升GCI运行稳定性,因此继续深入探究基于功率偏差的参数自适应和系统暂态稳定性之间的联系将会是接下来的研究重点。

附录A

文献[17]提出的惯性自适应控制算法原理为

$$\dot{\omega} = \frac{P^* - P - D(\omega - \omega_0)}{J_0/2 + \sqrt{J_0^2 - 4k(P^* - P - D(\omega - \omega_0))^2}} \quad (19)$$

式中: k 为惯性调节系数; P^* 为参考有功输出功率; P 为实际输出功率; ω 为VSG输出频率; ω_0 为VSG

额定频率; J_0 为初始虚拟惯性系数; D 为阻尼系数;根据文献[17],为避免算法病态,需保证根号下式子始终为正,因此应满足

$$k \leq \frac{J_0^2 D}{(P^* - P)_{\max}^2} \quad (20)$$

此外,观察式(19),开方结果始终为正,所以其分子存在一个最小值 $J_0/2$,因此该算法的惯性系数始终有 $J > J_0/2$,即惯性的变化范围受到约束。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview of micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-187.
ZHANG Yuhuan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospect of control strategy for DC micro-grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-187.
- [3] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [4] LIU Ju, YANG Dongjian, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 429-437.
- [5] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [6] 颜湘武, 吕佳伟, 贾焦心, 等. 双级式有功备用光伏虚拟同步机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 61-68.
YAN Xiangwu, LÜ Jiawei, JIA Jiaoxin, et al. Two-stage standby active photovoltaic virtual synchronous[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 61-68.
- [7] FANG J, LI H, TANG Y, et al. On the inertia of future more-electronics power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7(4): 1171-1178.
- [8] FANG J, LIN P, LI H, et al. An improved virtual inertia control for three-phase voltage source converters connected

- to a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(9): 8660-8670.
- [9] 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 adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731.
- [10] 丁佳微. 基于虚拟同步发电机技术的分布式电源自适应惯量控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [11] 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.
- [12] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertial of adaptive control method ofVSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [13] 杨赞, 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.
- [14] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴, 等. 微网自适应旋转惯量VSG控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 111-115.
ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing, et al. Optical storage microgrid system based on adaptive rotating inertia VSG control strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 111-115.
- [15] 周建萍, 胡成奕, 茅大钧, 等. 基于模糊控制的自适应虚拟同步发电机控制策略[J]. 广东电力, 2020, 33(1): 53-60.
ZHOU Jianping, HU Chengyi, MAO Dajun, et al. Adaptive virtual synchronous generator control strategy based on fuzzy control[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(1): 53-60.
- [16] 邹蕴韬, 张海涛, 刘春阳, 等. 新型虚拟同步发电机控制方法及其暂态过程自适应控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 933-941.
ZOU Yuntao, ZHANG Haitao, LIU Chunyang, et al. A control approach of novel virtual synchronous generator and an adaptive control strategy for its transient process[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 933-941.
- [17] HOU X, SUN Y, ZHANG X, et al. Improvement of frequency regulation in VSG-based AC microgrid via adaptive virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(2): 1589-1602.
- [18] 刘尧, 陈建福, 侯小超, 等. 基于自适应虚拟惯性的微电网动态频率稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 75-82, 140.
LIU Yao, CHEN Jianfu, HOU Xiaochao, et al. Dynamic frequency stability control strategy of microgrid based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 75-82, 140.
- [19] 刘尧, 林超, 陈滔, 等. 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率—电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 16-21, 133.
LIU Yao, LIN Chao, CHEN Tao, et al. Reactive power-voltage control strategy of AC microgrid based on adaptive virtual impedances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 16-21, 133.
- [20] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [21] CHENG H, SHUAI Z, SHEN C, 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.
- [22] WU H, RUAN X, YANG D, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4295-4303.
- [23] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey of frequency regulation in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [23] 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.

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-10-15

作者简介:

于晶荣(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量分析与控制技术; E-mail: jingrong@csu.edu.cn

孙文(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式能源、电能质量控制技术等; E-mail: 943976288@qq.com

于佳琪(1989—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: yujq629@foxmail.com

(编辑 魏小丽)