

虚拟同步发电机参数自适应调节

任海鹏, 陈琦, 张亮亮, 李洁[†]

(西安理工大学 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 虚拟同步发电机技术借由控制器设计达到模拟同步发电机外特性的效果, 改善了含有新能源的电网系统的稳定性. 根据虚拟同步发电机参数可调的特点, 可采用参数自适应调节优化系统动态性能. 但传统虚拟同步发电机参数自适应调节仍存在两方面不足: 一方面, 大范围调整阻尼下垂系数和虚拟转动惯量, 对系统储能裕量要求高; 另一方面, 暂态调节过程中存在功率超调现象, 对电力设备不利. 本文引入输出速度反馈调节系统阻尼, 为改善系统暂态稳定性提供了方便的调节手段; 其次, 根据系统暂态功角特性, 提出了参数自适应控制策略, 缩短了调节时间, 将频率偏差减小至允许范围内, 改善了电网频率调节的暂态性能, 同时抑制了功率超调. 最后, 对比实验结果表明本文控制策略优于现有的自适应控制策略.

关键词: 电网; 暂态稳定性; 虚拟同步发电机; 系统阻尼; 自适应控制

引用格式: 任海鹏, 陈琦, 张亮亮, 等. 虚拟同步发电机参数自适应调节. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2571 – 2580

DOI: 10.7641/CTA.2020.90123

Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control

REN Hai-peng, CHEN Qi, ZHANG Liang-liang, LI Jie[†]

(Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing,
Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: The virtual synchronous generator technology analogs the characteristics of the synchronous generator via the controller design. It improved the stability of the grid systems which include the new energy. At the same time, according to the adjustable characteristics of the virtual synchronous generator parameters, the parameter adaptive adjustment is used to improve the dynamic performance of the system. However, the traditional virtual synchronous generator adaptive control technology still has two drawbacks: on the one hand, the large-scale adjustment of the damping droop coefficient and the virtual moment of inertia requires the system having a high energy storage margin; On the other hand, there is a power overshoot phenomenon in the transient regulation process, which is disadvantageous to the power equipment. First, this paper provides a convenient adjustment method for improving the transient stability of the system, the system damping is adjusted by introducing the output speed feedback. Second, according to the transient power-angle characteristics of the system, a parameter adaptive control strategy is proposed, which shortens the transient adjustment time and ensures that the deviation of the system frequency in the transient adjustment process is within the allowable range, and improves the transient performance of the grid frequency adjustment, at the same time, the power overshoot is suppressed. Finally, the experimental results show that the proposed control strategy is superior to the existing adaptive control strategy.

Key words: power grid; transient stability; virtual synchronous generator; system damping; adaptive control

Citation: REN Haipeng, CHEN Qi, ZHANG Liangliang, et al. Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2571 – 2580

1 引言

随着新能源发电的发展, 大量新能源, 如太阳能发电、风能发电等, 通过电力电子变换器接入电网, 使电网的稳定性分析和控制变得复杂和严峻^[1]. 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术使新

能源发电节点具有和传统同步发电机相似的外特性, 改善(含有大量)新能源电网的稳定性提供了有效的途径^[1-4]. VSG并网系统的稳定性, 是指在扰动信号(功率扰动, 线路参数摄动等)作用下, 系统维持功率平衡的能力. VSG的控制需要确定4个参数, 即虚拟转动惯

收稿日期: 2019-03-04; 录用日期: 2020-08-27.

[†]通信作者. E-mail: lijie@xaut.edu.cn.

本文责任编辑: 徐胜元.

陕西省自然科学基金研究计划重大项目(2016ZDJC-01), 陕西省重点研发计划一般项目——工业领域项目(2018GY-165)资助.

Supported by the Natural Science Foundation Major Project of Shanxi Province (2016ZDJC-01) and the General Projects of Key R&D Programs of Shaanxi Province—Industrial Field (2018GY-165).

量 J 、阻尼下垂系数 D_p 、积分增益 K 、电压下垂系数 D_q , 其中 D_p 和 D_q 在并网标准中规定^[5-6]分别为频率波动或电压幅值波动导致的对应有功功率或无功功率的变化量^[3]. VSG暂态稳定性是指电力系统遭受暂态扰动时保持同步的能力^[7]. 传统方法通常通过调节参数 D_p 或 J 来提高系统的暂态稳定性. 文献[8-9]详细分析了VSG功角特性, 据此提出了调节参数 J 来改善暂态稳定性的原则, 并利用Lyapunov定理证明了系统稳定性, 但文中并未给出 J 的具体数学描述形式. 文献[10-11]通过对分布式电源小信号模型的分析, 确定了自适应参数 J 的选取原则. 文献[12]采用了模糊控制的思想实现了参数 J 的自适应调节. 上述文献仅从虚拟转动惯量 J 的角度出发, 忽略了阻尼下垂系数 D_p 对于抑制系统暂态振荡的贡献. 文献[13-14]分析了 D_p 对系统的影响, 提出根据频率波动, 自适应调节 D_p 的方法, 并通过小信号模型证明了该算法可以有效的减小功率超调以及调节时间. 文献[15]利用输出功率的偏差作为反馈, 自适应地调节系统的阻尼因子. 文献[16-19]综合考虑了参数 J 和 D_p 对于系统暂态稳定性的贡献, 给出了两个参数的选取原则. 在此基础上, 文献[20]采用粒子群优化算法, 以频率偏差和电压偏差为性能指标函数, 得到 J 和 D_p 的优化值, 并利用Lyapunov直接法对系统的暂态稳定性进行了分析. 文献[21]综合考虑超调量和调整时间等暂态指标, 建立虚拟同步发电机暂态响应的模型, 提出VSG控制参数 J 和 D_p 的自适应调节策略. 不同于上述文献, 文献[22]在详尽分析有功功率和频率振荡过程的基础上, 提出了暂态各阶段虚拟角加速度的最优判据, 以改善功率和频率的暂态响应.

综上所述, 目前参数自适应控制主要有3种: J 自适应调节、 D_p 自适应调节、 J/D_p 自适应调节. 这些控制方案均是基于VSG功角特性曲线, 通过改变 J 及 D_p 优化暂态过程. 主要存在两大问题: 第一, 现有方法存在较大功率响应超调, 电力电子变换器中的元器件将承受较大的暂态冲击, 对变换器可靠性和寿命产生不良影响; 第二, 自适应参数 J/D_p 调节范围大. J 对应的物理实体为储能单元, J 变化越大对储能单元的变化量要求就越高^[23]. 此外, J 越大, 在有功调压控制环路截止频率处造成的相角滞后就越大, 系统相角裕度就越小^[5-6]; 因此, J 过大容易引发系统的功角振荡^[24-28].

为解决这一问题, 本文提出利用输出速度反馈控制调节系统阻尼的方法, 在分析VSG暂态响应过程的基础上, 提出了利用速度反馈系数和虚拟转动惯量自适应调节系统暂态响应, 动态过程中保证频率变化不超过阈值, 抑制功率超调. 同时, J 的调节量相对现有方法大幅度减小. 最后, 通过对比实验验证了所提控制算法的有效性和优越性.

本文后面内容如下安排: 第2节介绍VSG基本原理, 分析通过输出速度反馈控制实现系统阻尼调节; 第3节在分析功角暂态调节过程的基础上, 设计了VSG自适应控制方法; 第4节进行实验对比分析, 验证所提方法的正确性和优越性; 第5节给出结论.

2 VSG基本原理

VSG工作在并网模式下, 可以等效为一个理想电压源与输出阻抗串联的模式, 如图1所示.

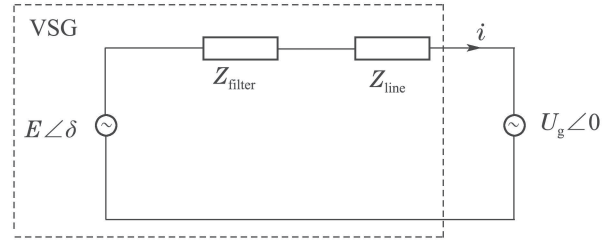


图1 VSG等效模型

Fig. 1 VSG equivalent model

图1中: E 为VSG励磁电动势, U_g 为电网相电压, Z_{filter} 为滤波阻抗, Z_{line} 为线路阻抗, i 为并网电流.

VSG在并网条件下受大电网的牵制, 故以电网电压为参考 $U_g \angle 0$, 定义逆变器的输出相电压为 $E \angle \delta$, 其中 δ 为两个电压相量之间的相位差, 即功角, 表达式为

$$\delta = \int (\omega - \omega_0) dt, \quad (1)$$

式中: ω_0 为电网电压角速度, ω 为虚拟同步机角速度.

VSG输出电流 $\dot{I}$ 可以表示为

$$\dot{I} = \frac{E \angle \delta - U_g \angle 0}{Z} = \frac{E \angle \delta - U_g \angle 0}{r + jX}, \quad (2)$$

式中: Z 为系统阻抗包含两部分, 即滤波阻抗 Z_{filter} 和线路阻抗 Z_{line} ; r 表示其中的阻性成分; X 表示其中的感性成分, 阻抗角 $\alpha = \tan^{-1}(X/r)$.

故VSG输出视在功率 S 可表示为

$$\begin{aligned} S &= 3U_g \dot{I}^* = 3U_g \frac{E \angle (-\delta) - U_g \angle 0}{r - jX} = \\ &= 3 \frac{U_g}{Z} (E \cos(\alpha - \delta) - U_g \cos \alpha + \\ &\quad jE \sin(\alpha - \delta) - jU_g \sin \alpha) = \\ &= P_e + jQ, \end{aligned} \quad (3)$$

式中“*”表示共轭.

由式(3)得, VSG输出有功功率 P_e 和无功功率 Q_e 分别为

$$\begin{cases} P_e = 3 \frac{EU_g}{Z} \cos(\alpha - \delta) - 3 \frac{U_g^2}{Z} \cos \alpha, \\ Q_e = 3 \frac{EU_g}{Z} \sin(\alpha - \delta) - 3 \frac{U_g^2}{Z} \sin \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

一般情况下, 线路电抗呈感性, 即 $\alpha \approx 90^\circ$, 且同步发电机功角 δ 小于 30° , 可认为 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$,

则式(4)可化简如下:

$$\begin{cases} P_e = 3 \frac{EU_g}{Z} \delta, \\ Q_e = 3 \frac{EU_g - U_g^2}{Z}. \end{cases} \quad (5)$$

2.1 有功控制环路

VSG没有转子环节, 通过控制构造摇摆方程, 实现系统功率调节, 表达式如下:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p(\omega - \omega_0), \quad (6)$$

其中 T_m 和 T_e 分别为同步发电机的机械转矩和电磁转矩. 又因为

$$\begin{cases} P_m = T_m \omega \approx T_m \omega_0, \\ P_e = T_e \omega \approx T_e \omega_0, \end{cases} \quad (7)$$

方程两边同时乘以电网角速度 ω_0 , 得

$$J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_0), \quad (8)$$

式中: $\frac{d\omega}{dt}$ 是虚拟角加速度; P_m 是系统的输入功率(等效同步发电机的机械输入功率); P_e 是系统的输出功率(等效同步发电机的电磁功率); 令 $D = \omega_0 D_p$, ω_0 为电网角频率.

采用小信号建模分析的方法, 可以得到VSG有功功率—频率控制环的结构图, 如图2所示.

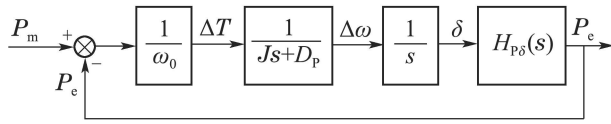


图2 VSG有功功率控制环框图

Fig. 2 VSG active power control loop diagram

图中 $H_{P\delta}(s)$ 表示有功功率角传递函数, 由式(5)可知

$$H_{P\delta}(s) = \frac{3EU_g}{Z}. \quad (9)$$

有功功率控制环的开环传递函数:

$$G(s) = \frac{P_e}{P_m} = \frac{H_{P\delta}(s)}{J\omega_0 s^2 + D_p \omega_0 s}. \quad (10)$$

系统阻尼比为

$$\zeta = \frac{D_p}{2} \sqrt{\frac{\omega_0}{J}} \sqrt{\frac{Z}{3EU_g}}. \quad (11)$$

系统参数设置如表1^[5-6]所示. 稳态情况下, VSG输出的有功功率 P_e 和无功功率 Q_e 分别与其指令值 P_{ref} 和 Q_{ref} 相等, 则可以根据式(4)得到系统稳态解:

$$\begin{cases} \delta_s = \alpha - \tan^{-1} \left(\frac{ZQ_{ref}/3 + U_g^2 \sin \alpha}{ZP_{ref}/3 + U_g^2 \cos \alpha} \right), \\ E_s = \frac{ZQ_{ref}/3 + U_g^2 \sin \alpha}{U_g \sin(\alpha - \delta_s)}. \end{cases} \quad (12)$$

计算可知, 有功功率控制环路的截止频率为8.31 Hz, 在两倍工频的1/10以内, 能有效抑制瞬时有功功率的脉动量对输出电压频率和相角的影响. 同时, 相角裕度为66.48°, 具备较好的抗扰能力.

表1 主要仿真参数

Table 1 The main simulation parameters

参数	数值
直流电压/V	250
交流相电压有效值/V	70.7107
滤波电感/L/H	7E-3
滤波电容/C/F	4E-6
线路电感 L_{line} /H	2E-3
线路电阻 R_{line} /Ω	0.6
虚拟转动惯量初值 J_0	0.0025
积分增益 K	2000
阻尼下垂系数 D_p	0.3
电压下垂系数 D_q	42.4264

根据式(11), 系统阻尼可以通过虚拟转动惯量 J 或参数 D_p 进行调节. 但存在的问题是: 参数 J 和 D_p 受限于储能设备容量, 调节能力有限, 若仅依赖 J 调节限制暂态过程中频率变化的范围代价太大(瞬时所需储能裕量大). 此外, 虚拟转动惯量过大, 可能引发功角持续振荡^[24-28]; 若仅依赖 D_p 调节同样存在调节范围大的问题: 虽然同时调节 J 和 D_p 的方法充分利用了参数特性, 一定程度上缩小了调节范围, 但效果并不明显且参数匹配复杂. 针对这些问题, 本文提出通过输出速度反馈增益调节系统阻尼. 将输出量的微分信号采用负反馈形式反馈到输入端并与误差信号相比较, 可以改变整个系统等效阻尼, 从而调整系统动态过程, 改善系统平稳性, 同时可以提高系统相角裕量. 增加输出速度(微分)反馈后, 系统框图如图3所示.

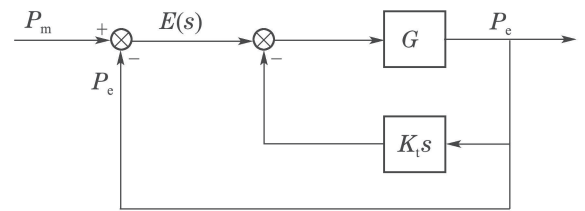


图3 输出速度反馈控制框图

Fig. 3 Block diagram of output speed feedback control

此时系统闭环传递函数表示为

$$\begin{aligned} \phi(s) &= \frac{G(s)}{1 + G(s)(1 + K_t s)} = \\ &= \frac{H_{P\delta}(s)}{J\omega_0 s^2 + (D_p \omega_0 + H_{P\delta}(s) K_t) s + H_{P\delta}(s)} = \\ &= \frac{H_{P\delta}(s)/(J\omega_0)}{s^2 + \frac{D_p \omega_0 + H_{P\delta}(s) K_t}{J\omega_0} s + H_{P\delta}(s)/(J\omega_0)}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $G(s) = \frac{3EU_g/Z}{J\omega_0 s^2 + D_p\omega_0 s}$ 为有功功率控制环的开环传递函数。

系统的无阻尼自然振荡频率 ω_n 以及阻尼比 ζ 为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{H_{P\delta}(s)/(J\omega_0)}, \\ \zeta = \frac{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t}{2\sqrt{H_{P\delta}(s) \times J\omega_0}}, \end{cases} \quad (14)$$

可见, 通过改变 K_t 和 J 可实现闭环系统阻尼的调节。

根据式(14)可计算出速度反馈系数 K_t 。

$$K_t = \frac{2\zeta\sqrt{H_{P\delta}(s) \times J\omega_0} - D_p\omega_0}{H_{P\delta}(s)}. \quad (15)$$

2.2 输出速度反馈对系统性能的影响

将原系统开环传递函数式(10)化成标准I型系统:

$$G(s) = \frac{\frac{H_{P\delta}(s)}{D_p\omega_0}}{s(\frac{J}{D_p}s + 1)}. \quad (16)$$

令系统的开环增益 $K = \frac{H_{P\delta}(s)}{D_p\omega_0}$, 时间常数 $T = \frac{J}{D_p}$ 。

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}. \quad (17)$$

加入输出速度反馈后有功功率控制环的开环传递函数 $G_v(s)$ 为

$$G_v(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)K_t s} = \frac{\frac{H_{P\delta}(s)}{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t}}{s(\frac{J\omega_0}{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t}s + 1)}. \quad (18)$$

$$f_c = \sqrt{\frac{\sqrt{\frac{(D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t)^4 + 4(H_{P\delta}(s)J)^2}{\omega_0^2}} - \frac{(D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t)^2}{\omega_0}}{8(J\pi)^2\omega_0}}. \quad (24)$$

可知, $\frac{df_c}{dK_t} < 0$, 因此系统截止频率随着速度反馈系数 K_t 的增大而减小。

综上所述, 如果 $K_t > 0$, 系统的相角裕量就有所提高, 有利于改善系统的平稳性。同时, 系统截止频率降低, 保证了系统对功率脉动的抑制能力。

进一步, 原系统开环增益与加入输出速度反馈后系统开环增益之比为

$$\frac{K_v}{K} = \frac{D_p\omega_0}{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t} = \frac{1}{1 + \frac{H_{P\delta}(s)K_t}{D_p\omega_0}}. \quad (25)$$

选择表1的参数信息计算可知, 原系统开环增益是

令系统开环增益

$$K_v = \frac{H_{P\delta}(s)}{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t},$$

时间常数

$$T_v = \frac{J\omega_0}{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t},$$

可得

$$G_v(s) = \frac{K_v}{s(T_v s + 1)}. \quad (19)$$

加入输出速度反馈后, 系统相角裕量 γ :

$$\begin{aligned} \gamma &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan(T_v\omega) = \\ &90^\circ - \arctan\left(\frac{J\omega_0}{D_p\omega_0 + H_{P\delta}(s)K_t}\omega\right), \end{aligned} \quad (20)$$

可知, 相角裕量 γ 随着速度反馈系数 K_t 的增大而增大。

根据式(17)计算可知, 原系统截止频率 f_{c0} 处的幅值:

$$|G(j2\pi f_{c0})| = \left| \frac{K}{j2\pi f_{c0}(Tj2\pi f_{c0} + 1)} \right| = 1. \quad (21)$$

求解式(21)可得

$$f_{c0} = \sqrt{\frac{\sqrt{D_p^4\omega_0^2 + 4(H_{P\delta}(s)J)^2} - D_p^2\omega_0}{8(J\pi)^2\omega_0}}. \quad (22)$$

加入速度反馈后, 系统截止频率 f_c , 根据式(19)可得

$$|G_v(j2\pi f_c)| = \left| \frac{K_v}{j2\pi f_c(T_v j2\pi f_c + 1)} \right| = 1. \quad (23)$$

求解式(23)可得

加入速度反馈后开环增益的1.8倍左右, 而且I型系统, 对阶跃输入的稳态误差为0, 因此, 加入输出速度反馈后对稳态性能影响不大。

此外, 为了进一步降低微分反馈的影响, VSG本体参数设计, 保证了系统较低的截止频率^[5-6], 有效的衰减高频噪声。选择表1的参数, 设定系统阻尼 $\zeta = 1.1$, 根据式(9)(12)(15)可计算参数 $K_t = 0.01$, 绘制原系统有功功率—频率控制环和加入输出速度反馈作用后系统的Bode图, 如图4所示。

可知, 输出速度反馈的作用使得系统相角裕度提升, 为79.28°。同时, 系统截止频率为5.68 Hz, 在两倍工频的 $\frac{1}{10}$ 以内, 充分的抑制了系统功率的脉动量及输出微分反馈可能引入的高频噪声的影响。

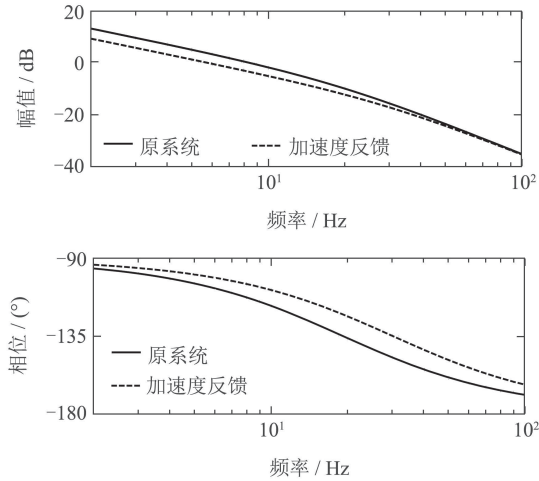


图 4 原系统与加入输出速度反馈控制后频率特性对比
Fig. 4 The frequency characteristic comparison between the original system and the system incorporated in speed feedback control

3 VSG自适应控制

3.1 J 与系统暂态稳定性的关系

本文采用 J 和 K_t 同时调节来避免需要大储能储备量和调节动态过程中 D_p 的变化. 引入速度反馈后VSG的摇摆方程可表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e - K_t \frac{dP_e}{dt}}{\omega_0} - D_p(\omega - \omega_0), \quad (26)$$

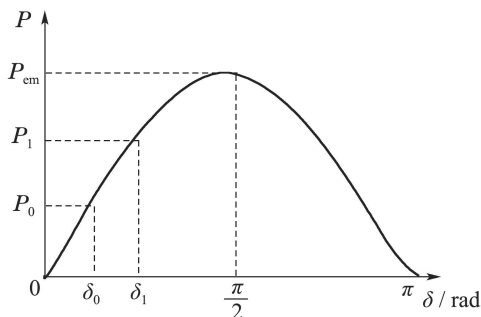
变换可知

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e - K_t \frac{dP_e}{dt} - D_p \omega_0 (\omega - \omega_0)}{J \omega_0}. \quad (27)$$

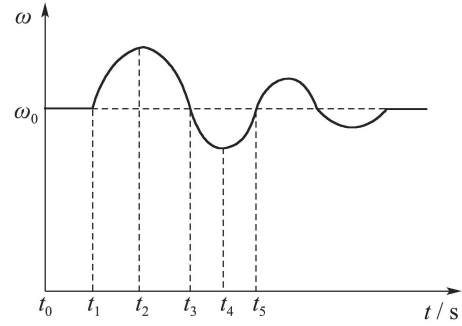
虚拟角速度变化率 $\frac{d\omega}{dt}$ 与虚拟转动惯量 J 成反比. 即 J 越大, 虚拟角速度 ω 变化越慢; 反之, J 越小, ω 变化越快. 下一小节将根据式(27)中描述的角速度的变化率与虚拟转动惯量成反比的关系来设计参数自适应规律.

3.2 VSG扰动暂态响应过程分析

当功率扰动打破功率平衡时, 依据“有功调频”的同步机制, VSG自主调节输入功率 P_m , 使系统重新恢复平衡, 暂态调节过程示意图如图5所示, 图(a)为VSG功角与输入功率之间的关系, 图(b)为调节过程中频率变化曲线示意图.



(a) VSG功角曲线



(b) 暂态调节过程中频率变化曲线示意图

图 5 VSG功角曲线和暂态过程频率变化曲线示意图

Fig. 5 VSG power angle curve and frequency variation

VSG暂态调节过程及其功角特性具体分析如下:

$t_0 - t_1$ 阶段: VSG 输入有功功率 $P_m = P_0$ 与输出电磁功率 P_e 基本相等, 即 $P_0 \approx P_e$, $\omega \approx \omega_0$, $\frac{d\omega}{dt} \approx 0$, 系统处于平衡状态.

$t_1 - t_2$ 阶段: 功率扰动使得输入功率 P_m 跃变为 P_1 , 而电磁功率 P_e 瞬时不变, 造成功率不平衡现象, 即 $P_m = P_1 > P_e = P_0$. 此时, $\Delta\omega = (\omega - \omega_0) > 0$, $\frac{d\omega}{dt} > 0$, 可见, 在这个阶段, 频率偏差为正, 同时, 频率变化率也为正, 意味着频率偏差正在向增大的方向变化, 此时, 如果频率变化率绝对值也较大, 则通过增加 J 来减小频率变化率, 抑制频率(和频率偏差)的增加. 因此, 虚拟转动惯量 J 的调节规律为

$$J = \begin{cases} J_0 + \frac{k_1}{e^{|\frac{\Delta\omega}{2\pi}|}}, & |\frac{d\omega}{dt}| \geq T, \\ J_0, & |\frac{d\omega}{dt}| < T, \end{cases} \quad (28)$$

式中: J_0 为虚拟转动惯量初值; $\frac{\Delta\omega}{2\pi} = \Delta f$ 为系统频率相对于电网频率的偏离程度; T 是为了防止 J 频繁调节而设置的虚拟角速度变化率阈值; k_1 为调节系数, 可按式(29)计算.

$$k_1 = (J_{\max} - J_0)e^{|\Delta f_{\max}|}, \quad (29)$$

式中: $\Delta f_{\max}$ 为系统频率变化的允许阈值, 依据国家标准GB/T15945-2008《电能质量电力系统频率允许偏差》的规定^[29]: 电力系统正常运行情况下, 频率偏差范围为 ± 0.2 Hz. 若微网系统的装机容量较小时, 可以放大余量, 可允许频率偏差值为0.5 Hz, 本文设置 $|\Delta f_{\max}| = 0.5$ Hz, 式(29)中 k_1 的设置可以保证 J 最大为 $J_{\max}$.

虚拟转动惯量 J 越大, 动态性能越差, 且在截至频率处造成的相角滞后越大, 导致系统的相角裕度减小, 甚至可能引发VSG功角的持续性振荡. 本文增加了输出速度反馈控制, 可以不用 J 过大调节就可以实现较强的频率调节能力, 因此, $J_{\max}$ 偏离 J_0 的设置可比单

纯采用虚拟转动惯量调节的范围小得多,从而降低储能容量改变量。

$t_2 - t_3$ 阶段: $\Delta\omega > 0$, $\frac{d\omega}{dt} < 0$, 虚拟角速度 ω 处于减速状态. 此时, 可以不做调节, 保持频率自然趋近期望值便可, 但考虑到如果趋近过程中频率变化率绝对值过大导致振荡次数增加, 因此, 在频率变化率绝对值过大时, 减小虚拟转动惯量 J , 使得负的(小于0的)角速度变化率向值增大的方向(也是绝对值减小的方向)趋近于0. 因此, J 的调节规律为

$$J = \begin{cases} J_0 - \frac{k_2}{e^{|\frac{\Delta\omega}{2\pi}|}}, & |\frac{d\omega}{dt}| \geq T, \\ J_0, & |\frac{d\omega}{dt}| < T, \end{cases} \quad (30)$$

k_2 为调节系数, 取值由式(31)确定:

$$k_2 = (J_0 - J_{\min})e^{|\Delta f_{\max}|}, \quad (31)$$

$J_{\min}$ 不应该偏离 J_0 太远, 因为, 偏离 J_0 太大将导致较大的角速度变化率阻碍频率趋稳. 由于输出速度反馈作用, 使得 J 的调节可以很小, 对应储能容量的变化量相应较小, 减小了在标称虚拟转动惯量对应的储能容量基础上需求的储能变化量。

$t_3 - t_4$ 阶段: $\Delta\omega < 0$, $\frac{d\omega}{dt} < 0$, 与 $t_1 - t_2$ 阶段类似, 虚拟角速度 ω 处于加速阶段. J 的调节方式与 $t_1 - t_2$ 阶段一致。

$t_4 - t_5$ 阶段: $\Delta\omega < 0$, $\frac{d\omega}{dt} > 0$, 类似于 $t_2 - t_3$ 阶段的控制要求, J 的调节方式与 $t_2 - t_3$ 阶段一致。

下面分析阻尼的参数自适应规律. 暂态调节过程中, 为了保证系统功率不出现明显超调, 同时, 缩短暂态调节时间, 设置系统阻尼 $\zeta = 1.1$, 对应速度反馈系数 K_t 的计算可由式(9)(12)(15)得到. 但应注意以下两种情况:

第1种情况: 当系统频率变化大于频率阈值, 即 $|\Delta f| > \Delta f_{\max} = 0.5 \text{ Hz}$ 时, 为了抑制频率增长, 设置频率变化率 $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 根据式(27)可计算:

$$K_t = \frac{P_m - P_e - \omega_0 D_p(\omega - \omega_0)}{\frac{dP_e}{dt}}. \quad (32)$$

第2种情况: 当系统频率变化在安全阈值内时, 即 $|\Delta f| \leq \Delta f_{\max} = 0.5 \text{ Hz}$, 如果 $|\frac{d\omega}{dt}| > T$ 说明频率波动较大, 采用速度反馈系数增大系统阻尼, 设置 $\zeta = 1.3$ 使系统频率尽快平稳。

综上所述, 本文提出的VSG参数自适应控制规律如下:

如果 $\Delta\omega < 2\pi\Delta f_{\max}$,

$$J = \begin{cases} J_0 + \frac{k_1}{e^{|\frac{\Delta\omega}{2\pi}|}}, & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} > 0, |\frac{d\omega}{dt}| > T, \\ J_0 - \frac{K_2}{e^{|\frac{\Delta\omega}{2\pi}|}}, & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} < 0, |\frac{d\omega}{dt}| > T, \\ J_0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (33)$$

K_t 的计算可由式(9)(12)(15)得到, 其中系统阻尼的选择如式(34):

$$\zeta = \begin{cases} 1.3, & |\frac{d\omega}{dt}| > T, \\ 1.1, & |\frac{d\omega}{dt}| \leq T. \end{cases} \quad (34)$$

否则, 如果 $\Delta\omega > 2\pi\Delta f_{\max}$:

$$\begin{cases} J = J_0, \\ K_t = \frac{P_m - P_e - \omega_0 D_p(\omega - \omega_0)}{\frac{dP_e}{dt}}. \end{cases} \quad (35)$$

经过上述各阶段调控后, 系统功率达到新的平衡状态。

3.3 VSG参数自适应稳定性分析

加入输出速度反馈控制后, 系统闭环传函如式(13)所示, 可得系统特征根为

$$s_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{B}}{2J\omega_0}, \quad (36)$$

其中:

$$A = D_p\omega_0 + \frac{3EU_g}{Z}K_t,$$

$$B = (D_p\omega_0 + \frac{3EU_g}{Z}K_t)^2 - 4J\omega_0 \frac{3EU_g}{Z}.$$

又因为 $J\omega_0 > 0$, 所以 $s_{1,2}$ 在 s 平面的分布主要由分子决定. 如系统稳定, 则参数 $A > 0$, 即 $D_p\omega_0 + \frac{3EU_g}{Z}K_t > 0$, 可得

$$K_t > -\frac{D_p\omega_0}{\frac{3EU_g}{Z}}. \quad (37)$$

在此基础上,

1) 当 $B < 0$ 时, $s_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{B}}{2J\omega_0}$ 为左半平面的一对共轭复根, 系统稳定;

2) 当 $0 \leq B < A^2$ 时, $s_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{B}}{2J\omega_0}$ 为左半平面的负实根, 系统稳定;

3) 当 $B \geq A^2$ 时, $s_1 = \frac{-A - \sqrt{B}}{2J\omega_0} < 0$ 位于左半平面, $s_2 = \frac{-A + \sqrt{B}}{2J\omega_0} > 0$ 位于右半平面, 系统不稳定。

综上所述, 系统稳定需要满足的条件为

$$\begin{cases} A > 0, \\ B < A^2, \end{cases} \quad (38)$$

即

$$\begin{cases} K_t > -\frac{D_p \omega_0}{\frac{3EU_g}{Z}}, \\ J > 0. \end{cases} \quad (39)$$

显然, 自适应控制过程中 $J > 0$ 可以得到保证, 而 K_t 的取值有两种情况分析如下:

a) $\Delta\omega \leq 2\pi\Delta f_{\max}$ 时,

$$K_t = \frac{2\zeta\sqrt{J\omega_0\frac{3EU_g}{Z}} - D_p\omega_0}{\frac{3EU_g}{Z}} = \frac{2\zeta\sqrt{J\omega_0\frac{3EU_g}{Z}}}{\frac{3EU_g}{Z}} + \frac{-D_p\omega_0}{\frac{3EU_g}{Z}} > \frac{-D_p\omega_0}{\frac{3EU_g}{Z}},$$

系统满足稳定条件;

b) $\Delta\omega > 2\pi\Delta f_{\max}$ 时,

$$K_t = \frac{P_m - P_e - D_p\omega_0(\omega - \omega_0)}{\frac{dP_e}{dt}}.$$

根据阻尼下垂系数 D_p 的定义^[2-3]:

$$D_p = \frac{\Delta P}{\omega_0(\omega - \omega_0)} = \frac{P_e - P_{e0}}{\omega_0(\omega - \omega_0)}, \quad (40)$$

其中 P_{e0} 表示扰动前的 VSG 功率。

根据式(1)和式(5)得

$$\frac{dP_e}{dt} = 3\frac{EU_g}{Z}(\omega - \omega_0) + 3\frac{U_g}{Z}\delta\frac{dE}{dt}. \quad (41)$$

若满足系统稳定条件, 则有

$$K_t = \frac{P_m - P_e - D_p\omega_0(\omega - \omega_0)}{\frac{dP_e}{dt}} > -\frac{D_p\omega_0}{\frac{3EU_g}{Z}}. \quad (42)$$

将上述不等式右边移到左边, 同时将等式(40)代入, 得到

$$\frac{\frac{3EU_g}{Z}(\omega - \omega_0)(P_m - 2P_e + P_{e0}) + \frac{dP_e}{dt}(P_e - P_{e0})}{\frac{3EU_g}{Z}\frac{dP_{e0}}{dt}(\omega - \omega_0)} > 0. \quad (43)$$

注意到本情况是系统频率产生波动越限时的控制, 此时有两种情况: 第1种情况是系统频率正向超过额定阈值, 此时有

$$\begin{cases} \omega - \omega_0 > 0, \\ \frac{dP_e}{dt} > 0, \\ P_m - P_e > 0. \end{cases} \quad (44)$$

由式(44)可知, 式(43)分母大于0, 不等式(43)只要其分子多项式大于0即可, 将式(41)代入(43)分子多项式, 得到分子多项式大于零的条件是

$$\begin{aligned} & \frac{3EU_g}{Z}(\omega - \omega_0)(P_m - P_e) + \\ & 3\frac{EU_g}{Z}(\omega - \omega_0)(P_{e0} - P_e) + \\ & 3\frac{EU_g}{Z}(\omega - \omega_0)(P_e - P_{e0}) + \\ & 3\frac{U_g}{Z}\delta\frac{dE}{dt}(P_e - P_{e0}) > 0, \end{aligned} \quad (45)$$

上式第2项和第3项抵消, 于是得到稳定条件为

$$\begin{aligned} & \frac{3EU_g}{Z}(\omega - \omega_0)(P_m - P_e) + \\ & 3\frac{U_g}{Z}\delta\frac{dE}{dt}(P_e - P_{e0}) > 0. \end{aligned} \quad (46)$$

又因为 E 是一个缓慢的物理量, 因此 $\frac{dE}{dt}$ 很小近似为0, 故上式条件变为

$$\frac{3EU_g}{Z}(\omega - \omega_0)(P_m - P_e) > 0. \quad (47)$$

由式(44)可见, 上式恒成立, 即此时系统稳定。

另外一种情况, 当频率小于额定值越限时, 式(44)中所有大于号变为小于号, 类似推导可以得到相同结论, 至此, 参数自适应调节过程中的稳定性得到证明。

相较于传统的恒定阻尼和恒定虚拟转动惯量控制来说, 系统不能瞬时从初始点变化到新的平衡点, 当加速面积超过减速面积时, 就会发生暂态失稳^[7]。自适应控制针对系统暂态不同阶段的响应特点, 提出了分阶段实时调控的控制策略, 不仅提高了系统暂态稳定性, 增强了系统鲁棒性, 同时, 提高了系统动态性能。本文提出的自适应控制策略特点是: 一方面, 通过速度反馈控制使系统阻尼调节不再仅依赖于阻尼下垂系数 D_p 和虚拟转动惯量 J 的大范围调节, 抑制了系统功率超调, 同时, 缩短了暂态调节时间; 另一方面, 通过速度反馈系数的自适应调节限制了动态过程中系统频率变化阈值, 有效避免了 VSG 动态调节过程中, 因频率变化越限而脱网。

4 实验验证

为了验证上述理论分析的正确性, 实验室搭建了搭建了 TMS320F28335 数字控制器为核心的三相逆变器样机, 逆变器输出通过变压器与电网相连, 样机参数如表1所示。开关管选用 IGBT 模块 FF150R12RT4, 开关管驱动芯片选用 1EDI60I12AF, 逆变器侧电感电流信号通过电流霍尔 CSNE151-100 采样, 电容电压及电网电压信号通过电压霍尔 HNV025 A 采样, 实验装置如图6所示。实验控制周期为 200 μ s, 逆变器开关频率为 10 kHz。

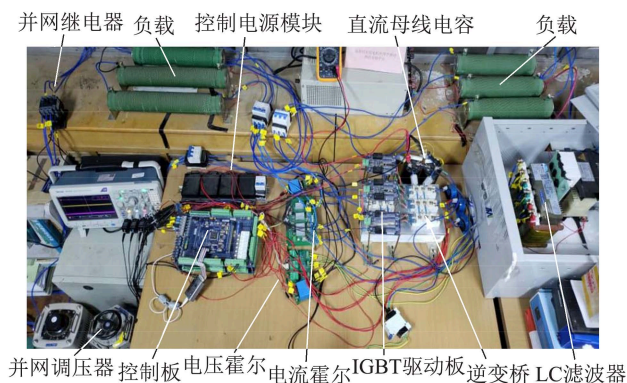


图6 实验平台

Fig. 6 Experiment platform

实验设置: VSG系统初始有功功率为157 W、无功功率为0 var, 6 s时, 有功功率变为600 W, 无功功率保持不变, 实验结果, 如图7-9所示. 其中: J 自适应控制为文献[8-9]的方法; D_p 自适应控制为文献[13]的方法; J 和 D_p 参数自适应控制为文献[16]的方法.

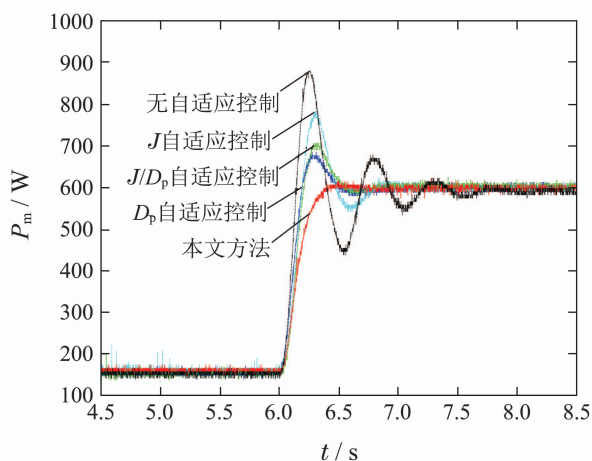


图7 VSG不同控制策略的功率响应

Fig. 7 VSG power responses of different control methods

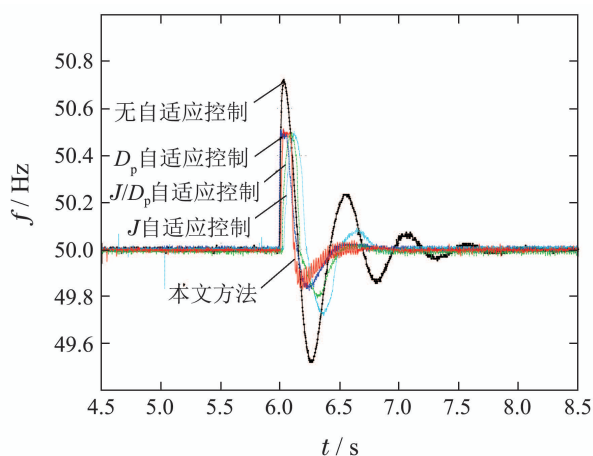


图8 VSG不同控制策略的频率响应

Fig. 8 VSG frequency responses of different control methods

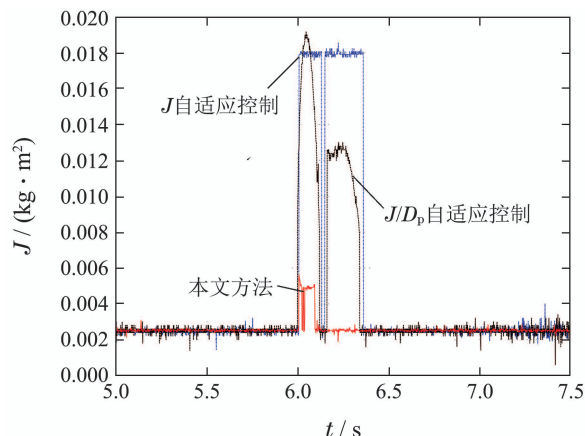
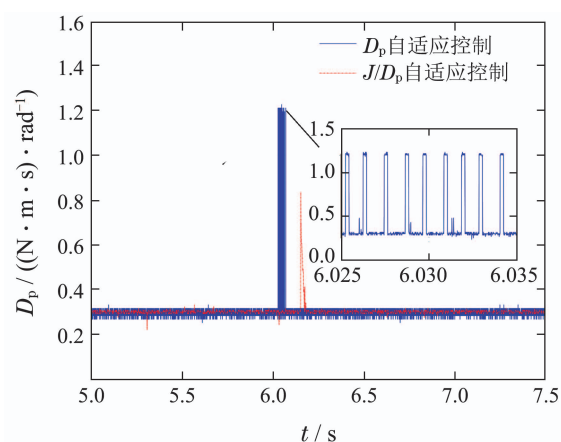
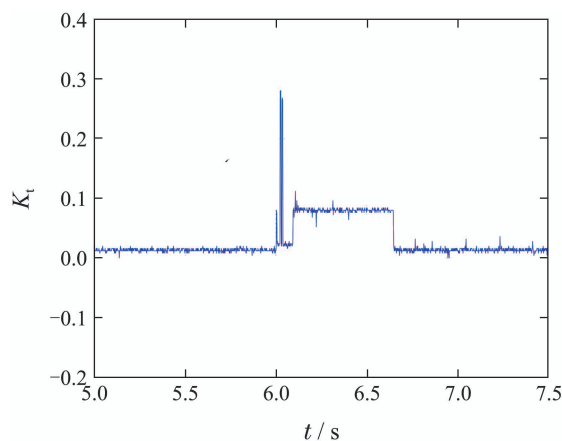
(a) VSG不同控制策略暂态过程 J 的调节(b) D_p 和 J/D_p 自适应控制暂态过程 D_p 的调节(c) 本文方法暂态过程 K_t 的调节

图9 VSG不同控制策略的参数调节曲线

Fig. 9 Parameter adjustment curve of different control strategies

图7和图8是本文方法和现有各种方法调节过程和稳态的功率变化和频率变化曲线. 从实验结果可知, J/D_p 恒定的方法在功率波动时, 暂态过程功率超调高达50%, 调节时间1.5 s, 且系统频率瞬时超出安全限定工作的0.5 Hz, 导致VSG脱网, 不利于系统稳定. 采用 J 自适应控制, 系统频率波动和功率超调在一定程度上

上得到改善, 但功率超调依然明显, 同时由图9(a)可见, 采用 J 单独调节, J 的变化范围较大; 采用 D_p 自适应控制, 当且仅当系统频率超过阈值时, 增大阻尼下垂系数 D_p 限制频率波动, 图9(b)中可见这种方法对应的 D_p 快速振动, 不利于实际调节; 采用 J 和 D_p 同时自适应调节, 性能有所改善, 但仍存在上述问题, 相对于本文方法, 其动态响应时间长, 且 J/D_p 调节的瞬时值也较大. 采用本文的控制方法, 系统工作在过阻尼状态, 功率超调得到抑制, 同时, 系统频率波动范围被限制在0.5 Hz范围内, 且能够快速恢复稳定, 改善了系统暂态过程.

图9为对比的几种方法参数的调节曲线, 其中子图(a)为3种需要调节 J 的方法对应的 J 的变化曲线, 子图(b)为 D_p , J/D_p 自适应控制调节过程中 D_p 变化曲线, 子图(c)为本文方法输出速度反馈系数 K_t 的变化曲线. 由子图(a)可知, 为了限制频率阈值, J 自适应控制策略需要提供的虚拟转动惯量最大值为0.019, 是初值的7.6倍; J/D_p 自适应控制策略需要提供的虚拟转动惯量最大值也高达0.018; 而本文方法需要提供的瞬时虚拟转动惯量峰值仅为0.0056, 可见本文自适应控制方法需要的虚拟转动惯量调节裕量最小, 而且调节时间明显缩短; 由子图(b)可见, 采用 D_p 自适应控制或 J/D_p 自适应控制策略时, 所需的阻尼下垂系数变化范围较大, 其瞬时最大值为别达到了稳态值($D_{p0} = 0.3$)的4和2.8倍, 这将对系统提出更高的储能容量储备要求; 由子图(c)可见, 开始阶段系统阻尼维持在 $\zeta = 1.1$, 速度反馈系数 K_t 变化趋势与子图(a)本文方法中 J 的变化趋势一致. 当系统频率超过0.5 Hz时, J 减小, K_t 增大, 根据式(15)系统阻尼得到了增加, 限制了频率变化超过阈值; 随后, 较高的 K_t 值有效的减弱了频率的偏离程度, 最终, 当系统进入稳态时 K_t 恢复为初值.

综合以上实验结果, 对比现有3种不同的参数自适应调节方法实验中得到如下结论:

1) J 自适应调节, 为了动态过程平稳, 所需 J 的瞬时值增大, 导致系统阻尼降低, 从而进入欠阻尼状态, 出现功率超调, 实验结果如图7和图9(a)所示.

2) D_p 自适应调节, 增大 D_p 可以实现系统过阻尼, 但是 D_p 的增大仅发生在频率超过设定值的时候, 一旦频率降至设定值内则取为初值, 调节过程如图9(b)所示, 无法保证系统始终处于过阻尼, 功率响应也存在超调, 如图7所示.

3) J/D_p 自适应调节, 实验结果如图9(a)和(b)所示, 暂态调节过程中 J 和 D_p 同时调节的过程中无法有效保证系统处于过阻尼状态从而导致系统出现超调, 从功率响应结果图7也可得到证实.

本文方法的优点是抑制了功率超调, 限制了暂态频率变化的阈值, 同时具有良好的响应速度.

5 结论

VSG技术使得利用电力电子变换器接入电网的新能源发电系统能自主参与电网一次调频, 提高了系统的频率稳定性. 现有VSG自适应控制策略在不考虑储能限制的条件下, 充分利用虚拟转动惯量或阻尼下垂系数灵活可调的特点, 优化暂态性能, 但现有方法仍存在参数调节范围大, 调节时间长, 暂态超调大, 容易造成VSG脱网的问题. 针对这些问题, 本文提出一种基于输出速度反馈的VSG自适应控制策略. 主要贡献如下:

1) 采用输出速度反馈控制调节系统阻尼, 使系统工作在过阻尼特性下, 避免储能设备频繁重复充放电, 同时, 避免功率超调对电力设备造成不良影响. 调节过程中限制虚拟转动惯量的调节范围, 从而不需要过大的储能容量储备就可以达到改善VSG动态调节性能的目的.

2) 分析VSG功角特性曲线和瞬态调节过程的基础上得出新的VSG自适应控制原则, 能够抑制动态过程的功率超调, 加快调节过程, 同时限制了动态调整过程中频率的波动范围, 保证了动态过程中VSG不会因频率超限而脱网.

参考文献:

- [1] ZHONG Q C. Virtual synchronous machines: A unified interface for grid integration. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016, 3(4): 18 – 27.
- [2] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259 – 1267.
- [3] ZHONG Qingchang, TOMAS H. *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*. Beijing: China Machine Press, 2016: 248 – 257.
(钟庆昌, 托马斯-霍尔尼克. 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术. 北京: 机械工业出版社, 2006: 248 – 257.)
- [4] LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in microgrid. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591 – 2603.
(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. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591 – 2603.)
- [5] WU H, RUAN X B, YANG D S, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(7): 4292 – 4303.
- [6] WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Power synchronous generator modeling and parameter design for virtual synchronous generator. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6508 – 6518.
(吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508 – 6518.)
- [7] ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Virtual synchronous generator technology and prospects. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 165 – 169.
(郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165 – 169.)
- [8] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia. *IEEE*

- Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(2): 451 – 458.
- [9] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia. *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Denver, CO: IEEE, 2013. 4546 – 4552.
- [10] CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. An adaptive control method of rotor inertia for virtual synchronous generator. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 82 – 89. (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, 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82 – 89.)
- [11] SONG Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. An improved inertia adaptive control of virtual synchronous generator in multi-source independent microgrid. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 412 – 423. (宋琼, 张辉, 孙凯, 等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 412 – 423.)
- [12] HU Y, WEI W, PENG Y, et al. Fuzzy virtual inertia control for virtual synchronous generator. *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*. Chengdu, China: IEEE, 2016: 8523 – 8527.
- [13] ZHENG T, CHEN L, WANG R, et al. Adaptive damping control strategy of virtual synchronous generator for frequency oscillation suppression. *Proceedings of the 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*. Beijing: IET, 2016: 1 – 5.
- [14] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(2): 668 – 676.
- [15] LIANG S, CHEN W, QIN L, et al. Adaptive damping factor control strategy of inverter interfaced distributed generators based on virtual synchronous generator technology. *The 2018 International Conference on Power System Technology*. Guangzhou, China: IEEE, 2018: 4202 – 4207.
- [16] LI D, ZHU Q, LIN S, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 397 – 398.
- [17] WANG F, ZHANG L, FENG X, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 5124 – 5133.
- [18] FAN W, YAN X, HUA T. Adaptive parameter control strategy of VSG for improving system transient stability. *The 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia*. Kaohsiung: IEEE, 2017: 2053 – 2058.
- [19] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1462 – 1471.
- [20] RATHORE B, CHAKRABARTI S, ANAND S. Frequency response improvement in microgrid using optimized VSG control. *The 2016 National Power Systems Conference*. Bhubaneswar: IEEE, 2016. 1 – 6.
- [21] CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimized control of transient response of virtual synchronous generator based on parameter adaptive adjustment. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5742 – 5731. (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. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5742 – 5731)
- [22] XU N Y, WANG Y, LI M X, et al. An optimal control method of virtual angular acceleration to improve transient response based on virtual synchronous generator. *The 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia*. Kaohsiung: IEEE, 2017: 1559 – 1563.
- [23] ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Optimized configuration of virtual synchronous generator and energy storage unit. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(13): 22 – 31. (曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22 – 31.)
- [24] YA L W, ZHANG H, SONG Q, et al. Control strategy for parallel-operated virtual synchronous generators. *Power Electronics and Motion Control Conference*. Hefei, China: IEEE, 2016: 2015 – 2021.
- [25] LI Wuhua, WANG Jinhua, YANG Heya, et al. Power dynamic coupling mechanism of virtual synchronous generator and synchronous frequency resonance suppression strategy. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 381 – 390. (李武华, 王金华, 杨贺雅, 等. 虚拟同步发电机的功率动态耦合机理及同步频率谐振抑制策略, 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 381 – 390.)
- [26] DU Yan, SU Jianwei Lan, ZHANG Liuchen, et al. A mode adaptive microgrid frequency modulation control method. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 67 – 75. (杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 一种模式自适应的微网调频控制方法. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 67 – 75.)
- [27] HU C, CHEN K, LUO S, et al. Small signal modeling and stability analysis of virtual synchronous generators. *The 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Sydney: [s.n.], 2017: 1 – 5.
- [28] D'ARCO S, SUUL J A. Small-signal analysis of an isolated power system controlled by a virtual synchronous machine. *The 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*. Varna: IEEE, 2016: 462 – 469.
- [29] China National Standardization Administration. *GBT15945–2008 Power quality-frequency deviation for power system*. Beijing: China Standard Press, 2008. (中国国家标准化管理委员会. GBT15945–2008电能质量、电力系统频率允许偏差. 北京: 中国标准出版社, 2008)

作者简介:

任海鹏 博士, 教授, 目前研究方向为复杂系统分析与控制,

E-mail: renhaipeng@xaut.edu.cn;

陈琦 硕士研究生, 目前研究方向为虚拟同步机控制, E-mail:

411298085@qq.com;

张亮亮 硕士研究生, 目前研究方向为虚拟同步机预同步控制,

E-mail: 510652673@qq.com;

李洁 博士, 教授, 目前研究方向为电力电子变换器控制、

电机效率优化算法, E-mail: lijie@xaut.edu.cn.