

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.06.001

虚拟同步发电机与同步发电机动态特性的比较分析

李圣清, 张东辉, 罗朝旭, 陈 文

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对虚拟同步发电机(VSG)与同步发电机并联混合供电配合困难问题, 需明确VSG与同步发电机动态性能上的差异。首先介绍了VSG控制原理, 并建立数学模型, 同时在数学推导的基础上, 从惯量功率和频率动态响应两方面对逆变器与同步发电机动态性能进行分析。针对动态特性的不同, 根据频率响应时间及功率震荡程度重新整定VSG控制参数, 以减少两者动态特性差异。最后通过仿真分析指出, VSG在不同运行工况下所需要的转动惯量不同, 通过调整控制参数使VSG控制的逆变器动态特性更加接近同步发电机的, 甚至优于同步发电机的。

关键词: 微电网; 虚拟同步发电机; 动态响应; 同步发电机

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)06-0001-07

引文格式: 李圣清, 张东辉, 罗朝旭, 等. 虚拟同步发电机与同步发电机动态特性的比较分析[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 1-7.

A Comparative Analysis of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generators and Synchronous Generators

LI Shengqing, ZHANG Donghui, LUO Zhaoxu, CHEN Wen

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the difficulty found in the hybrid power supply of the virtual synchronous generators (VSG) and the synchronous generators, it is necessary to clarify the differences between the dynamic performance of the VSG and the synchronous generators. Firstly, the control principle of VSG has been introduced, with the mathematical model established. Meanwhile, on the basis of mathematical derivation, an analysis has been made of the dynamic performance of inverters and synchronous generators from two aspects of inertia power and frequency dynamic response. According to the different dynamic characteristics, the VSG control parameters are re-tuned according to the frequency response time and power oscillation degree, thus reducing the dynamic characteristics difference between the two. Finally, it is pointed out that the moment of inertia required by VSG is different under different operating conditions. By adjusting the control parameters, the dynamic characteristics of VSG controlled inverters are closer to that of synchronous motors, even characterized with a better performance than that of the synchronous generators.

Keywords: micro-grid; virtual synchronous generator; dynamic response; synchronous generator

收稿日期: 2018-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977072), 国家重点研发计划基金资助项目(2018YFB0606005), 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3129)

作者简介: 李圣清(1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事电能质量调节与控制技术, 微电网及电力电子系统控制技术方面的教学与研究, E-mail: lsq1961@sohu.com

1 研究背景

在孤岛、偏远山区等独立微电网中,为减少污染、降低发电成本、提高经济效益^[1-2],出现了新能源发电与发电机并联混合供电。随着新能源发电在电网中渗透率的提高^[3],电网也逐渐要求分布式电源及微电网能够同传统发电机组并联运行。

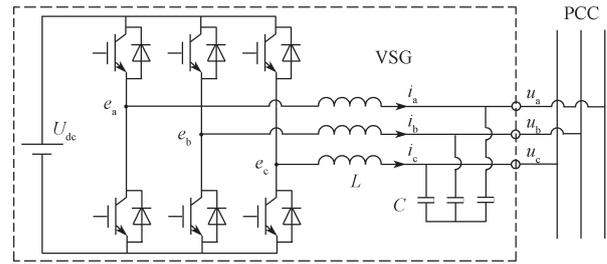
借鉴传统电力系统同步发电机的运行特性,将同步发电机运行特性移植到并网逆变器上,可以提高由并网逆变器构成的微电网系统的运行性能^[4]。文献[5-7]借鉴同步发电机转子运动方程和电压方程来控制逆变器运行,使逆变器在外特性上与同步发电机相似。虽然引入了同步发电机的外特性,使逆变器具有惯性、阻尼以及调频调压的能力,但仍与同步发电机在频率响应及惯量特性上存在差异。文献[8]分析了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制下的逆变器与同步发电机特性的差异,从惯量支撑与一次调频角度进行了分析验证,但对于两者动态特性上的差异没有进行研究。文献[9-10]采用小信号模型以及状态矩阵分析的方法,对比了虚拟同步发电机与下垂控制的动态性能,但文中将VSG控制下的逆变器等同于同步发电机,没有详细说明二者的区别。文献[11]研究了不平衡负载下的VSG与同步发电机组并联运行,提出电压序分量分解及电压补偿的改进VSG控制算法,但系统结构复杂,动态效果不明显。文献[12]提出基于模式切换的逆变器与发电机并联运行的控制策略,但逆变器控制采用常规控制算法,与发电机并联运行效果不理想,且模式切换增加了控制难度。文献[13]针对VSG的功率和频率动态无法兼顾的问题,提出自适应转动惯量控制,但文中没有考虑VSG的虚拟转动惯量与发电机转动惯量的区别。

本文在上述文献基础上,从虚拟同步发电机和同步发电机的惯量特性及负载扰动下的频率响应两方面入手,推导惯量功率表达式和频率响应小信号模型,并通过仿真实验模拟不同工况下VSG与同步发电机的动态特性,通过对比指出VSG在并网与离网不同运行方式下,所需的惯量不同,从而通过控制参数的调整以有效改善VSG的动态特性。

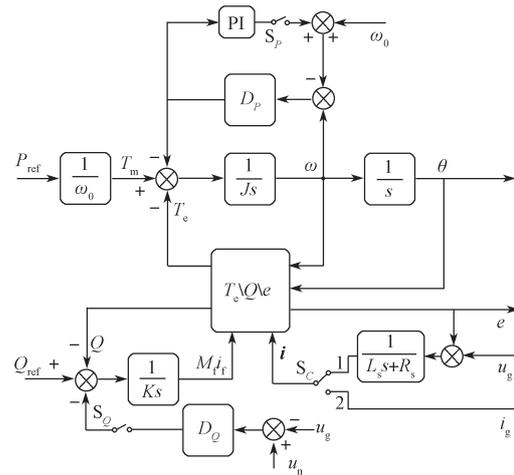
2 虚拟同步发电机原理

图1所示为虚拟同步发电机主电路图及控制框图,图1a中 U_{dc} 为直流母线电压, e_k 为内电势, i_k 为定子电流, u_k 为机端电压, L 为定子绕组电感, C 为滤波电容,其中 $k=a, b, c$ 。逆变器经PCC点接

入电网。



a) 主电路图



b) 控制框图

图1 虚拟同步发电机原理

Fig. 1 VSG principle diagram

由于VSG模拟了同步发电机的基本特性,所以它的控制模型与同步发电机数学方程相同,将发电机励磁特性引入控制中,控制方式为开环控制,控制框图如图1b所示,图中 P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率给定、无功功率给定, S 表示切换开关,具体的数学方程式如下:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p \Delta\omega, \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_0. \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = M_f i_f \langle \mathbf{i}, \mathbf{A} \rangle, \quad (2)$$

$$Q = -\omega M_f i_f \langle \mathbf{i}, \mathbf{B} \rangle, \quad (3)$$

$$\mathbf{e} = \omega M_f i_f \mathbf{A}. \quad (4)$$

式(1)~(4)中: T_m 、 T_e 、 J 、 D_p 、 ω 、 θ 、 ω_0 分别为机械转矩、电磁转矩、转动惯量、有功下垂系数、转子角速度、转子角度和额定角频率; M_f 为定子电抗常数; i_f 为励磁电流; $\langle \mathbf{i}, \mathbf{A} \rangle$ 、 $\langle \mathbf{i}, \mathbf{B} \rangle$ 均为内积;且 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [\sin\theta \quad \sin(\theta - 2\pi/3) \quad \sin(\theta + 2\pi/3)]^T, \\ \mathbf{B} = [\cos\theta \quad \cos(\theta - 2\pi/3) \quad \cos(\theta + 2\pi/3)]^T. \end{cases}$$

VSG 控制模拟了发电机的特性, 其动态性能取决于控制参数。\$D_p\$、\$D_Q\$、\$J\$、\$K\$ 是 4 个重要的设计参数, 其中 \$D_p\$ 满足

$$\begin{cases} D_p = -\frac{\Delta T}{\Delta \omega} \approx -\frac{\Delta P}{\omega_0 \Delta \omega}, \\ P = P_{\text{ref}} + D_p (\omega_0 - \omega) \omega_0. \end{cases} \quad (5)$$

阻尼系数设计为

$$D_p = \frac{\eta_p \cdot P_n}{\eta_f \cdot \omega_0^2}, \quad (6)$$

式中: \$P_n\$ 为虚拟同步发电机额定功率; \$\eta_f\$、\$\eta_p\$ 分别为频率和有功功率变化的百分比。

转动惯量 \$J\$ 满足

$$J = \tau_f D_p, \quad (7)$$

式中 \$\tau_f\$ 为频率时间常数, 取值为 0.002~0.2。

同理, 对无功下垂系数 \$D_Q\$ 进行设计, 满足

$$D_Q = -\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\eta_Q \cdot Q_n}{\eta_V \cdot V_n}, \quad (8)$$

式中: \$Q_n\$、\$V_n\$ 分别为虚拟同步发电机额定无功功率和额定电压; \$\eta_V\$、\$\eta_Q\$ 分别为电压和无功功率变化的百分比。

电压无功下垂参数 \$K\$ 满足

$$K = \tau_v D_Q \omega_0, \quad (9)$$

式中 \$\tau_v\$ 为电压时间常数, 本文取 0.02。

3 VSG 与同步发电机的惯量支撑特性对比

3.1 VSG 与同步发电机惯量特性

根据转子运动方程可知, 系统运行时各同步发电机的状态响应按式 (1) 转子运动规律变化。系统稳态运行时, 发电机转子额定转速为 \$\Omega_N\$ (一对极), 此时转子的动能为

$$W_k = \frac{1}{2} J \Omega_N^2 = \frac{1}{2} J \omega_N^2. \quad (10)$$

当由于功率不平衡引起系统频率变化时, 对应转子转速发生变化, 转子动能转化, 释放或吸收的能量对外表现为输出电磁功率的增减, 这就是同步发电机惯量支撑的物理意义。

由文献 [8] 可知, 同步发电机的惯量表达式为

$$P_J(t) = -\frac{S_N H}{f_0^2} f(t) \frac{df(t)}{dt}, \quad (11)$$

当系统频率变化值不大时

$$P_J(t) \approx -\frac{S_N H}{f_0} \frac{df(t)}{dt}. \quad (12)$$

式 (11) (12) 中: \$H\$ 为发电机转子惯性时间常数; \$S_N\$ 为发电机额定功率; \$f_0\$ 为系统额定频率。

对于 VSG 而言, 其参数的选择并不是按照发电机的实际物理意义选择。VSG 并没有像同步发电机那样具有较大的惯性, 考虑到储能的经济性以及逆变器响应的快速性, 应取较小的值。所以对于 VSG 的惯量支撑与式 (11) 或式 (12) 并不完全相同。

根据转子惯性时间常数的计算公式^[14]

$$H = J \omega_0^2 / S_N, \quad (13)$$

按照式 (6) (7) 转动惯量 \$J\$ 和阻尼系数 \$D_p\$ 的定义, 结合式 (13) 可以得到 VSG 的惯量支撑表达式为

$$P_J(t) = -\tau_f \frac{\eta_p}{\eta_f} \frac{f(t)}{f_0^2} \frac{df(t)}{dt} S_N, \quad (14)$$

当系统频率变化值不大时,

$$P_J(t) \approx -\tau_f \frac{\eta_p}{\eta_f} \frac{1}{f_0} \frac{df(t)}{dt} S_N. \quad (15)$$

3.2 电网频率扰动下 VSG 与同步发电机惯量对比

设定电网功率不平衡引起的系统频率变化曲线如图 2 所示。

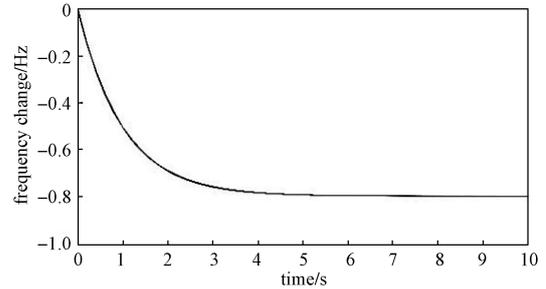


图 2 电网频率变化曲线

Fig. 2 Frequency changing curve of the power grid

在式 (12) (15) 的约束下, 同步发电机与 VSG 在系统频率变化时所提供的惯量功率变化曲线如图 3 所示。

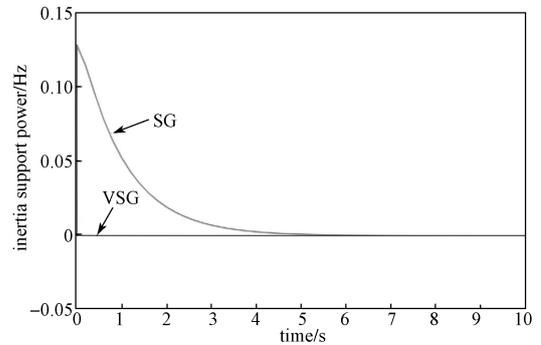


图 3 VSG 与同步发电机惯量支撑曲线

Fig. 3 VSG and SG of inertia support curves

观察图 3 可以明显看出, 相同额定容量下, 当电网频率剧烈变化时, 与同步发电机相比, VSG 为电

网提供的惯性支撑功率非常小, 最大值不足额定功率的1%。为了使VSG具有和同步发电机相似的惯量支撑特性, 可以通过增大频率时间常数来实现。图4为频率时间常数变化时的惯量支撑功率变化曲线。

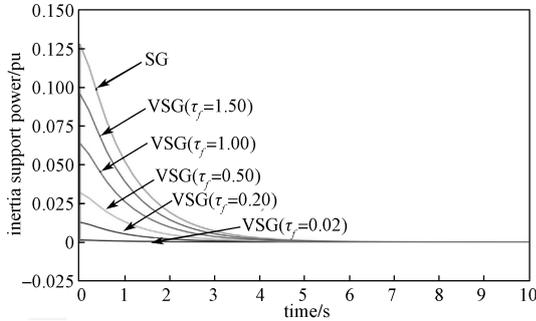


图4 同步发电机与VSG惯量支撑随频率时间常数变化时的曲线

Fig. 4 SG and VSG inertia support curves with frequency time constant

通过对比VSG与同步发电机的惯量特性变化曲线可以发现, 同步发电机在系统频率变化时能够提供可观的电磁功率, 而VSG则可以通过改变频率时间常数使其获得较大的惯量, 但同时也意味着这需要系统提供更大的储能启动。所以, 相比于同步发电机, VSG的惯量选择更加灵活, 但仍需要合理配置。在满足与同步发电机配合的条件下, 也应当考虑增加储能时的经济效益。

4 VSG与同步发电机的频率响应对比

4.1 VSG与同步发电机的小信号模型

分布式电源孤岛带负载运行示意图如图5所示, 图中 E_{dg} 为电源内电势, δ_{dg} 为功角, V_{bus} 为负荷端电压, X_s 、 X_{line} 分别为电源内电抗和线路电抗。

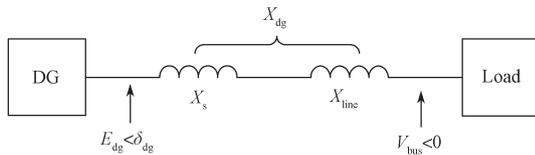


图5 分布式电源孤岛带负载运行示意图

Fig. 5 The diagram of distributed power island under the load operation

图5中分布式电源可以是小容量发电机组, 也可以是VSG控制下的逆变器。为分析方便, 假设等效电抗 X_{dg} 为感性电抗, 且 $X_{dg}=X_s+X_{line}$ 。根据潮流计算公式可得:

$$\Delta P_{out_sg} = E_{sg} V_{bus} \cos \delta_{sg} \Delta \delta_{sg} / X_{sg}, \quad (16)$$

已知 $s \Delta \delta_{sg} = (\Delta \omega_{sg} - \Delta \omega_{bus})$, 且令

$$K_{sg} = (E_{sg} V_{bus} \cos \delta_{sg} / X_{sg}),$$

则式(16)变为

$$s \Delta P_{out_sg} = K_{sg} (\Delta \omega_{sg} - \Delta \omega_{bus}). \quad (17)$$

根据发电机转子运动方程可得:

$$-k_{p_sg} \Delta \omega_{sg} - \Delta P_{out_sg} = J_{sg} \omega_0 s \Delta \omega_{sg} + \omega_0 D_{sg} (\Delta \omega_{sg} - \Delta \omega_g), \quad (18)$$

式中 k_{p_sg} 为调速器控制系数。

考虑在发电机运行方式下, 忽略线路电阻损耗, 有 $\Delta P_{dg} \approx \Delta P_{load}$ 、 $\Delta \omega_g \approx \Delta \omega_{bus}$ 。这种情况下, 消去 $\Delta \omega_g$, 根据式(17)(18)可得:

$$\frac{\Delta \omega_{sg}}{\Delta P_{load}} = -\frac{1 + (\omega_0 D_{sg} / K_{sg}) s}{J_{sg} s \omega_0 + k_{p_sg}}. \quad (19)$$

同理, 根据VSG控制方式, 可以得到如下VSG控制下逆变器单独运行时输出频率与负荷变化的传递函数:

$$-\Delta P_{out_vsg} = J_{vsg} \omega_0 s \Delta \omega_{vsg} + \omega_0 D_{vsg} \Delta \omega_{vsg}, \quad (20)$$

$$\frac{\Delta \omega_{vsg}}{\Delta P_{load}} = -\frac{1}{J_{vsg} \omega_0 s + D_{vsg} \omega_0}. \quad (21)$$

4.2 负载扰动下VSG与同步发电机的频率响应对比

根据上述分析, 可以得到负载扰动下的系统频率变化情况。负载扰动下同步发电机与逆变器的频率响应曲线如图6所示。

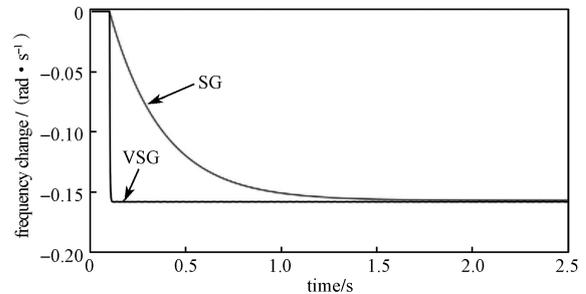


图6 负载扰动下VSG与同步发电机频率响应曲线

Fig. 6 VSG and SG frequency response curves under load disturbance

从图6中可以看出, 相同负荷扰动下, VSG的响应速度要比同步发电机响应速度快很多。因为同步发电机转子惯量较大, 使得频率变化缓慢调整过程的时间较长, 而逆变器响应速度过快, 会使得同步发电机速度跟不上逆变器, 导致两者配合困难。

为了配合同步发电机的运行, 且又不过多降低逆变器响应的快速性, 所以VSG的虚拟转动惯量值不能太小, 但从经济效益方面考虑, 其值亦不能太大。综合考虑, VSG的转动惯量值应取同步发电机转动惯量值的1/2为宜。图7所示为转动惯量变化时的频率响应曲线。

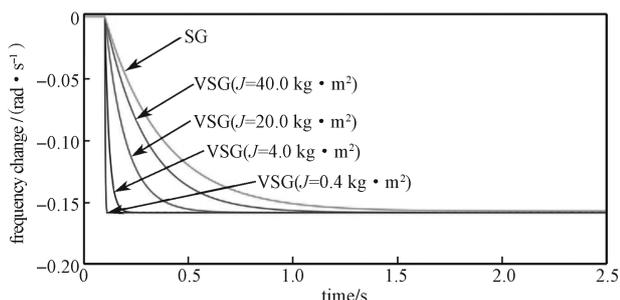


图 7 负载扰动下 VSG 与同步发电机在转动惯量变化时的频率响应曲线

Fig. 7 VSG and SG frequency response curves with inertia change under load disturbance

5 仿真分析

为了验证 VSG 与同步发电机动态特性的差异, 本文基于 Matlab/Simulink 搭建低压微电网仿真模型, 分别对逆变器并网与孤岛不同运行的情况进行仿真对比实验, 系统结构如图 8 所示, 仿真中主要参数如表 1、2 所示。

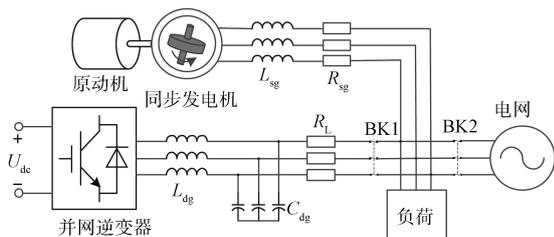


图 8 低压微电网仿真系统结构图

Fig. 8 Structural diagram of low voltage micro-grid simulation system

表 1 VSG 仿真参数

Table 1 The simulation parameters of VSG

系统参数	取值	系统参数	取值
E_{vsg}/V	380	D_p	10.132
S_{vsg}/VA	10	X'_g/pu	0.007 5
P_{ref}/pu	1.0	X_{line}/pu	0.13
$\omega_0/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314.3	$\Delta P_{load}/kW$	1.0
$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.021	V_{bus}/V	380

表 2 同步发电机仿真参数

Table 2 The simulation parameters of SG

系统参数	取值	系统参数	取值
E_{sg}/V	380	X_{sg}/pu	0.137 5
S_{sg}/kVA	10	X'_g/pu	1.9
$\omega_0/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314.3	X''_g/pu	0.7
$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.8	$\Delta P_{load}/kW$	1
$k_{p,sg}/pu$	20	V_{bus}/V	380
D_{sg}/pu	17		

图 8 中同步发电机由原动机拖动, 经线路阻抗接

入电网, 其中 L_{sg} 、 R_{sg} 分别为发电机连接的电感和电阻; 储能型并网逆变器 (仿真中用理想电压源代替) 经 LC 型滤波器并入电网, 其中 U_{dc} 为直流侧电压, L_{dg} 、 C_{dg} 分别为滤波电感和电容, BK1、BK2 为断路器。系统可以工作在离网或并网模式中, 当 BK2 闭合时, 系统并网运行, 此时发电机和逆变器一起向电网输入功率; 当 BK2 断开时, 系统处于离网运行模式。BK1 闭合时, 系统负荷由同步发电机与逆变器共同承担。

5.1 并网条件下电网频率突变时系统的响应特性

分布式电源接入电网正常运行, 2.5 s 时, 由于电网受到大扰动导致频率突然下降, 4 s 时电网频率恢复正常, 其变化曲线如图 9 所示。

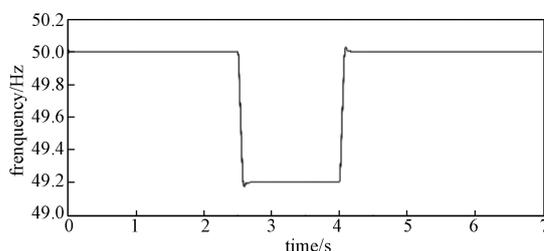
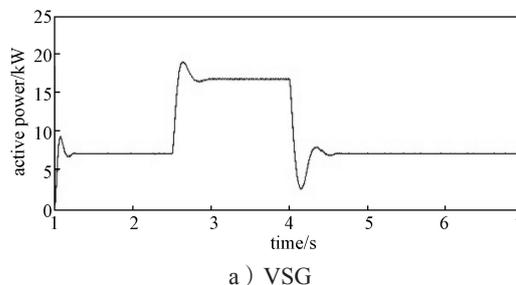


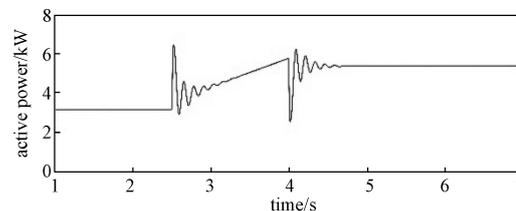
图 9 电网频率变化曲线

Fig. 9 Grid frequency change curve

图 10a、b 分别为 VSG 和同步发电机在电网频率变化时的输出有功功率曲线。



a) VSG



b) 同步发电机

图 10 电机输出有功功率曲线

Fig. 10 Generator output active power curve

对比图 10a、b 可以得知, VSG 的转动惯量可以灵活选择, 当采用较小的频率时间常数时, 系统惯量较小, 没有延迟, 当电网频率变化时 VSG 能够快速响应频率变化。而同步发电机固有惯量较大, 且不能改变, 当电网频率变化时, 同步发电机响应速度比较慢。所以当同步发电机与 VSG 并联运行时需要考虑

两者响应速度的配合。

为了能够配合同步发电机的频率响应, VSG 可以通过调整虚拟转动惯量来改善。图 11 所示为改变转动惯量时 VSG 的输出功率曲线。

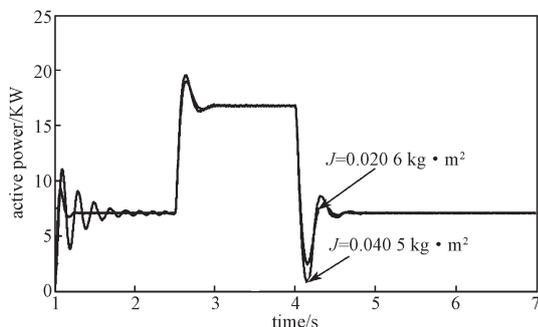
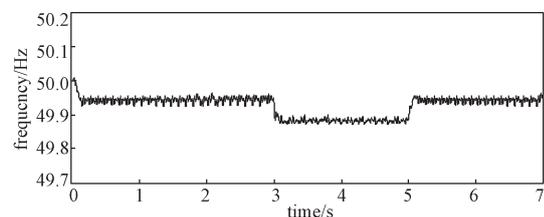


图 11 改变转动惯量时 VSG 输出的有功功率曲线对比
Fig. 11 Comparison of VSG output active power curve with a changing moment of inertia

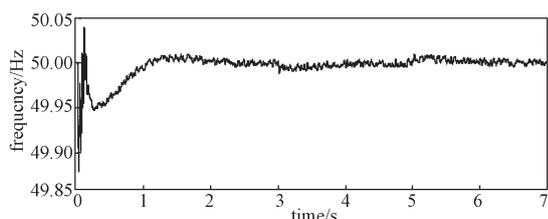
由图 11 可以得知, 转动惯量 J 直接影响 VSG 的功率输出, 当 J 增加至接近同步发电机转动惯量时, VSG 的功率响应与同步发电机相似。虽然较大的转动惯量意味着系统在暂态过程中可以提供更多的能量, 但也会给系统带来震荡风险。这与前文分析是一致的, VSG 既继承了同步发电机惯量特性的优点, 但同时也使系统容易出现功率震荡。所以在 VSG 并网运行时, 转动惯量不宜过大, 较小值的转动惯量可以降低震荡风险。

5.2 孤岛运行条件下负载突变时系统的响应特性

为了全面对比验证 VSG 与同步发电机的动态特性, 对系统孤岛工作情况进行了仿真分析。3 s 时两系统突加负荷, 导致 VSG 系统功率出现 10% 的有功缺额, 5 s 时恢复正常, 图 12 为 VSG 和同步发电机输出频率曲线。



a) VSG



b) 同步发电机

图 12 电机输出频率曲线

Fig. 12 Generator output frequency curve

对比图 12 可以看出, 当系统出现有功缺额时, 由于同步发电机的大惯量存在, 所以系统频率变化慢且偏差小, 而 VSG 输出频率变化较快, 但偏差相对较大。

VSG 孤岛运行时, 调整虚拟转动惯量参数, 使系统具有较大的惯量, 以延缓系统频率变化维持系统频率, 并为一次调频赢得时间。图 13 所示为改变转动惯量时 VSG 输出频率曲线。从图中可以看出, 孤岛运行时增大虚拟转动惯量可以为系统提供惯量功率, 改善 VSG 的输出频率响应, 延缓频率变化, 提高动态性能。

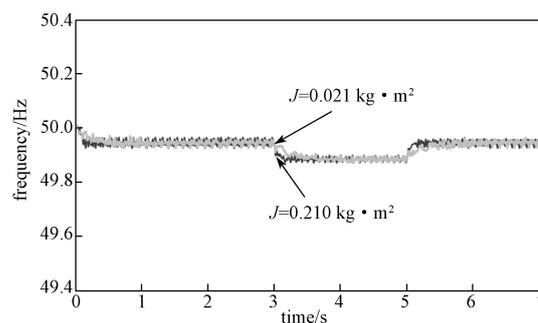


图 13 改变转动惯量时 VSG 输出频率曲线对比
Fig. 13 VSG output frequency curve comparison with a changing moment of inertia

6 结论

1) 针对 VSG 与同步发电机动态特性的差异进行研究, 通过与同步发电机的惯量支持特性的对比, 指出改变虚拟转动惯量可以使 VSG 的惯量特性与同步发电机接近。

2) 推导了 VSG 与同步发电机小信号模型, 并对两者的频率动态响应进行分析。与同步发电机相比, VSG 没有延迟, 当负荷变化时能够快速响应。

3) 通过并网及孤岛运行的仿真对比发现, 并网模式下, 较小的虚拟转动惯量可以提高系统响应速度, 降低系统出现功率震荡的风险, 孤岛情况下, VSG 需要较大的惯量提供频率支撑, 并为一次调频节省时间。

参考文献:

- [1] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Small-Signal Modeling and Parametric Sensitivity of a Virtual Synchronous Machine in Islanded Operation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 72: 3-15.
- [2] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.

- ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and Prospect of Virtual Synchronous Generator Technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [3] 曾正, 李辉, 冉立. 交流微电网逆变器控制策略述评[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 142-151.
- ZENG Zheng, LI Hui, RAN Li. Comparison on Control Strategies of Inverters in AC Microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 142-151.
- [4] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and Challenge of Virtual Synchronous Machine Technology in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [5] 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.
- [6] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the Grid Power Quality Using Virtual Synchronous Machines[C]//International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga: IEEE, 2011: 1-6.
- [7] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [8] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 36-43.
- QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional Orientation Discrimination of Inertia Support and Primary Frequency Regulation of Virtual Synchronous Generator in Large Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43.
- [9] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [10] D'ARCO S, SUUL J A. Virtual Synchronous Machines: Classification of Implementations and Analysis of Equivalence to Droop Controllers for Microgrids[C]// Proceeding of IEEE Grenoble Power Tech. Grenoble: IEEE, 2013: 1-7.
- [11] LIU J, YUSHI M, ISE T, et al. Parallel Operation of a Synchronous Generator and a Virtual Synchronous Generator Under Unbalanced Loading Condition in Microgrids[C]//8th International Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei: IEEE, 2016: 3741-3748.
- [12] 张雪妍, 马伟明, 付立军, 等. 基于模式切换的逆变器与发电机并联控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 220-229.
- ZHANG Xueyan, MA Weiming, FU Lijun, et al. Parallel Control Strategy of Inverter and Diesel Generator Based on Mode-Switching Method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 220-229.
- [13] 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[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 412-424.
- SONG Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Improved Adaptive Control of Inertia for Virtual Synchronous Generators in Islanding Micro-Grid with Multiple Distributed Generation Units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-424.
- [14] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 32-35.
- NI Yixin, CHENG Shousun, ZHANG Baolin. Theory and Analysis of Dynamic Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 32-35.

(责任编辑: 姜利民)