

基于小信号模型的 VSG 并联系统惯量特性分析*

颜湘武¹, 王雨薇¹, 郭玉威¹, 贾焦心¹, 刘正男²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网涞源县供电公司, 河北 保定 074300)

摘要:虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术是解决以电力电子变流器为接口的新能源渗透率, 逐渐提高导致系统惯性与阻尼减小问题的有效方法。而其核心参数虚拟转动惯量一直缺少选取原则, 特别是在多机并联以及出现的越来越多的变参数控制策略的情况下, 参数选取不当极易造成系统震荡。以一个两机系统为例, 搭建改进高阶小信号模型, 对具有同步发电机特性逆变电源虚拟转动惯量 J 变化对系统的影响进行了详细分析, 提出适用于自适应等灵活控制的 J 的选取原则, 根据稳定阈值及系统运行要求对参数进行选取, 可提高系统的稳定性能, 并通过仿真和实验验证了分析结果的正确性。

关键词:虚拟同步发电机; 小信号模型; 转动惯量; 稳定性; 特征根

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.017.004

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2019)17-0019-07

Inertia characteristic analysis of VSG parallel system based on the small signal model

Yan Xiangwu¹, Wang Yuwei¹, Guo Yuwei¹, Jia Jiaoxin¹, Liu Zhengnan²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China. 2. State Grid Laiyuan Power Supply Company, Baoding 074300, Hebei, China)

Abstract: The virtual synchronous generator (VSG) technology is an effective method to solve the problem of decreasing system inertia and damping caused by increasing the permeability of new energy source with power electronic converter as the interface. But the core parameters of the virtual rotational inertia have been lack of the selection principle. Especially in the case of multiple parallel machines and more variable parameter control strategies, the improper selection of parameters can easily cause system oscillation. Taking a two-machine system as an example, with the help of the high-order small signal model and its analysis method, the effect of virtual rotary inertia J with the characteristics of synchronous generator on the system is studied in detail. The selection principle of virtual moment of inertia J suitable for adaptive flexible control is proposed. The parameters are selected according to the stability threshold and system operation requirements, which can improve the stability performance of the system, and the correctness of the analysis is verified by simulation and experiment.

Keywords: virtual synchronous generator, small signal model, rotary inertia, stability, characteristic root

0 引言

分布式电源通常由逆变器接口接入电网, 以提高系统运行与控制的灵活性^[1]。人们希望其具有同步电机的惯量及阻抗, 提高系统运行的稳定性, 逐渐提出虚

拟同步发电机的概念^[2]。VSG 给逆变器赋予了类似同步发电机的转子惯性, 使频率变化具有一定的过渡时间, 换言之, 转动惯量控制是 VSG 控制的核心部分。文献[3]研究了虚拟惯性控制, 分析了在微电网中功率振荡的问题, 通过优化主电路抑制了这种振荡。文献[4]提出可变虚拟惯量的控制策略, 通过实时选择不同大小的虚拟惯量值实现快速平抑频率波动, 但没有给

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2015MS88); 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2015AA050603)

出不同虚拟惯量 J_{big} 与 J_{small} 的取值依据。VSG 技术可以提高微源接入电力系统的稳定性,现有文献大多从控制的角度对其进行研究,它的稳定性分析主要采用小信号分析方法^[5]。文献[6]结合同步发电机的功角曲线和转子惯量的物理意义,提出了一种自适应虚拟转子惯量的 VSG 控制算法,并通过对分布式电源小信号模型的分析,给出了自适应惯量系数的大致选取方法,但未给出此方法中系数 k 的具体取值原则,而且其小信号模型过于简略,不能反映系统的真实情况;文献[7-8]建立了更具体的单机 VSG 小信号模型,分析了各参数变化对系统稳定性的影响,但是其对单个参数的分析太过简略;文献[9]建立了两机并联的 VSG 小信号模型,并利用灵敏度分析了参数变化过程,但只是分析了其对根轨迹变化的影响,且研究对象的参数完全一致,与单机模型差别不大。

针对文献[3-9]存在的不足,在考虑两机参数不一致的情况下,搭建了具有同步发电机特性逆变电源并联模型,对应建立各个环节的高阶小信号模型,可以更具体的反映系统特性,通过引出非线性模型的数据,解决了初值敏感的问题。借助小信号模型及其分析方法,确定虚拟转动惯量的可选取参数范围,为可变虚拟惯量等控制策略提供依据,避免其选取不当造成的系统振荡,提高了系统的稳定性,并通过仿真和实验对其正确性进行了验证。

1 VSG 控制策略

两台 VSG 并联的整体控制结构如图 1 所示。

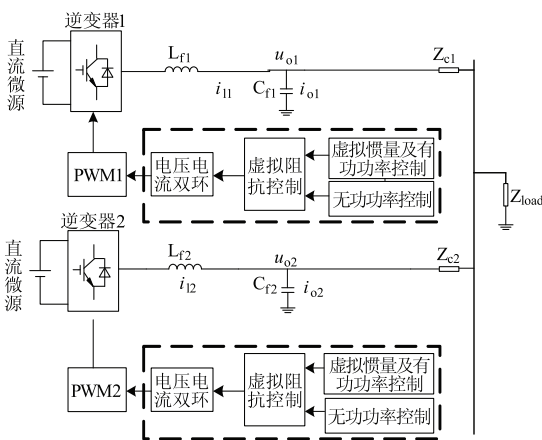


图 1 双机并联整体控制结构

Fig. 1 Double-machine parallel integrated control structure

两逆变器分别经过 LC 滤波,通过传输线路连接到公共母线,共同承担负载。接口控制采用模拟同步发

电机转动惯量、定子电阻、同步电抗的 VSG 算法,结合下垂控制,经电压电流双环产生调制波,进而控制逆变器开关通断^[10]。

1.1 功率控制

首先检测逆变器的输出电压、输出电流,计算瞬时有功功率、无功功率^[11],将其滤波后得到平均输出功率,即:

$$\begin{cases} \dot{P} = -w_c * P + \frac{3w_c}{2}(v_{od}i_{od} + v_{oq}i_{oq}) \\ \dot{Q} = w_c * Q + \frac{3w_c}{2}(-v_{od}i_{oq} + v_{oq}i_{od}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_{od} 、 v_{oq} 分别为逆变器 d、q 轴输出电压; i_{od} 、 i_{oq} 分别为逆变器 d、q 轴输出电流; w_c 为低通滤波器截止角频率; P 、 Q 分别为平均有功、无功功率; s 为频域算子。

为合理分配逆变器间有功功率,改善逆变器对波动的响应速度,采用同步发电机经典二阶方程控制策略^[12],主要体现在有功功率控制上,方程如下:

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_{n0} - \omega}{J\omega_{n0}m_p} + \frac{P_{ref} - P}{J\omega_{n0}} \quad (2)$$

式中 w 为逆变器输出角频率; w_{n0} 为额定参考角频率; J 为虚拟转动惯量; m_p 为有功-频率下垂系数; P_{ref} 为有功功率参考值。

无功功率采用无功-电压下垂控制^[13],d 轴参考电压设置为输出参考电压幅值,q 轴参考电压设置为 0。

$$\begin{cases} v_{dpd} = v_{n0} - n_q \\ v_{dpq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_{dpd} 、 v_{dpq} 分别为下垂控制器输出的 d-q 坐标系参考电压; v_{n0} 为额定电压; n_q 为无功下垂系数。

1.2 虚拟阻抗控制

光伏逆变通常与配网相连,这里的功率控制会产生有功、无功功率耦合。同时为避免低通滤波器造成的延迟,采用虚拟阻抗控制^[14]。

$$\begin{cases} v_{od}^* = v_{dpd} - r_v i_{od} + i_{oq} \omega L_v \\ v_{oq}^* = v_{dpq} - \omega L_v i_{od} - i_{oq} r_v \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_{od}^* 、 v_{oq}^* 分别为经过虚拟阻抗后的输出电压,也即后一级电压电流双环的给定参考值; r_v 、 L_v 表示虚拟电阻值、电感值; i_{od} 、 i_{oq} 表示逆变器输出电流。

1.3 电压电流双环控制

为达到逆变器输出电压无差跟踪给定电压并快速响应负载变化的目标,采用电压电流双环结构。根据内膜原理,d-q 坐标下 PI 控制器即可达到无静差,各量

关系如图2所示。

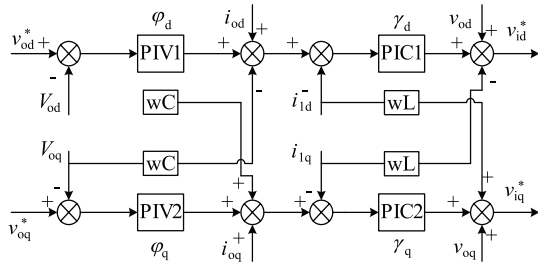


图2 d-q坐标系下控制框图

Fig. 2 Control block diagram in d-q coordinate system

图2中, v_{od} 、 v_{oq} 表示滤波电容电压; φ_d 、 φ_q 、 γ_d 、 γ_q 分别表示电压外环、电流内环引入的状态变量; i_{id} 、 i_{iq} 表示滤波电感电流; v_{id}^* 、 v_{iq}^* 表示电压环PI调节器输出的电压参考值。

2 并联VSG小信号建模

2.1 坐标变换

文中建模均基于d-q旋转坐标系。选取第一台虚拟同步发电机坐标作为参考,统一各台机坐标,第 n 台VSG虚拟内电势的角度超前 δ_{vn} ,各VSG输出量变换到参考坐标下的公式如下:

$$\begin{cases} \delta_{vn} = \int (\omega_n - \omega_1) dt \\ \begin{bmatrix} g_d \\ g_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_{vn}) & -\sin(\delta_{vn}) \\ \sin(\delta_{vn}) & \cos(\delta_{vn}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_d \\ g_q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

式中 w_n 为VSG $_n$ 的旋转角速度; g_{d-q} 为d-q轴变量; g_{D-Q} 为D-Q轴变量。

相应的角度小信号模型如下, Δ 代表小扰动:

$$\dot{\delta}_{vn} = \Delta w_n - \Delta w_1 \quad (6)$$

2.2 接口及负载

VSG与负载间接口含滤波器与线路阻抗。状态变量选取如下:滤波电感电流、电容电压、线路电感电流以及负载电流。以负载端关系为例进行说明,其他线路按照选取状态变量获得接口小信号模型。式(7)中, L_{load} 、 R_{load} 为负载电感、电阻; i_{loadd} 、 i_{loadq} 分别为d-q坐标下负载电流; v_{bd} 、 v_{bq} 分别为d-q坐标下负荷端电压。

$$\begin{cases} \dot{\Delta i_{loadd}} = -\frac{R_{load}}{L_{load}} \Delta i_{loadd} + \Delta \omega i_{loadq} + \omega \Delta i_{loadq} + \frac{1}{L_{load}} \Delta v_{bd} \\ \dot{\Delta i_{loadq}} = -\frac{R_{load}}{L_{load}} \Delta i_{loadq} - \Delta \omega i_{loadd} - \omega \Delta i_{loadd} + \frac{1}{L_{load}} \Delta v_{bq} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 整体模型

结合以上环节,并在工作点线性化,可以得到整个系统状态方程:

$$\dot{\Delta x_{state}} = A \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_{load} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 A 表示系统状态矩阵; Δx_{state} 分为3部分共含29个状态变量如下。

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= [\Delta \omega_1; \Delta P_1; \Delta Q_1; \Delta \varphi_{d1}; \Delta \varphi_{q1}; \Delta \gamma_{d1}; \Delta \gamma_{q1}; \\ &\Delta i_{ld1}; \Delta i_{lq1}; \Delta v_{od1}; \Delta v_{oq1}; \Delta i_{od1}; \Delta i_{oq1}] \\ \Delta x_2 &= [\Delta \omega_2; \Delta P_2; \Delta Q_2; \Delta \varphi_{d2}; \Delta \varphi_{q2}; \Delta \gamma_{d2}; \Delta \gamma_{q2}; \\ &\Delta i_{ld2}; \Delta i_{lq2}; \Delta v_{od2}; \Delta v_{oq2}; \Delta i_{od2}; \Delta i_{oq2}; \Delta \delta_{v2}] \\ \Delta x_{load} &= [\Delta i_{loadd}; \Delta i_{loadq}] \end{aligned}$$

2.4 稳态工作点求解

系统参数变化时,稳态工作点会发生变化,需不断更新状态矩阵和特征值。由于选取VSG $_1$ 作为基准坐标,其内电压角度为系统的0参考角,其角频率为未知量,系统共6个未知量; $x_{state} = [U_{v1}, w_1, U_{v2}, \delta_{v2}, U_3, \delta_3]^T$ 。列出6个非线性方程:

$$\begin{cases} f_{dp1p} = P_{ref1} - \frac{\omega}{m_{p1}} + \frac{\omega_0}{m_{p1}} - P_{G1} = 0 \\ f_{dp1q} = \frac{U_{r1}}{n_{q1}} - \frac{U_{v1}}{n_{q1}} - Q_{G1} = 0 \\ f_{dp2p} = P_{ref2} - \frac{\omega}{m_{p2}} + \frac{\omega_0}{m_{p2}} - P_{G2} = 0 \\ f_{dp2q} = \frac{U_{r2}}{n_{q2}} - \frac{U_{v2}}{n_{q2}} - Q_{G2} = 0 \\ f_{pq3p} = P_{in1} + P_{in2} - P_{o3} = 0 \\ f_{pq3q} = Q_{in1} + P_{in2} - Q_{o3} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 P_{ini} 、 Q_{ini} 为第 i 台逆变器注入母线的有功、无功; P_{o3} 、 Q_{o3} 为母线向负载提供的有功、无功。

初值选取不当极易造成系统振荡,这里均从模型中引出,并直接与小信号模型建立联系,避免手动调参和求解失误,综上得到小信号模型,描述此系统动态特性。按照以上控制策略,搭建两台不同参数的电压源型VSG并联,对应设置相同的小信号模型参数,并在0.6s设置负载扰动,两种模型各变量曲线基本稳合。

3 虚拟转动惯量及稳定阈值分析

3.1 虚拟同步发电机的转动惯量

电网的频率变化通常由系统功率不平衡的冲击

引起,在此过程,系统中各台同步机都会感受到不平衡功率的作用,此时各同步机状态变量的响应由转子运动方程描述。而电网频率变化时,系统中发电机的转子速度基本同步变化,在此过程中,发电机转子动能也相应发生变化,如果施加到转子上的机械输入功率保持不变,转子动能的变化量将以发电机电磁功率的形式注入电网中,此功率即为惯量支撑功率。

VSG是在传统下垂控制的基础上加入转子运动方程来模拟转子惯性和阻尼特性,进而提供惯量支撑,即虚拟同步发电机技术是具有转子惯性的下垂控制,引入的转动惯量是VSG的重要参数,与前端的能源装置动态特性以及系统运行要求密切相关。与传统同步发电机不同,模拟惯量可以任意取值,实现更灵活的运用和调节。由式(2)可得:

$$(J\omega_0 s + \frac{1}{m_p})\Delta w = -\Delta P \quad (10)$$

将 Δw 近似为 dw/dt ,由式(10)可知, J 与角频率变化率 dw/dt 成反比, J 越大, dw/dt 越小,频率变化率也越小。从负载扰动的角度考虑,希望 J 较大以减缓频率变化率,扰动结束后希望频率快速恢复,越来越多的控制策略如自适应通过改变 J 的大小来满足微网对性能的要求,这对转动惯量的参数选取提出了要求^[15]。

3.2 状态矩阵特征根计算及虚拟转动惯量对其位置的影响

将稳态工作点带入系统状态矩阵,得到29个特征根,利用此小信号模型可分析不同工况下系统的动态特性。主要对由同步电机特性引入的虚拟转动惯量进行研究,计及参数变化引起稳态工作点的变化,借助最直观的根轨迹图,分析其从 $0.0003 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 变化至 $1.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 过程中系统特征根的变化情况。各特征根实部为负值,此时系统小信号稳定。

转动惯量 J 由小到大变化时,特征根轨迹见图3。特征根1、2到虚轴距离远大于其他特征根,其虚部所表示的振荡频率与系统稳态频率相近。参数变化过程中,特征根3~14及22~29基本不变,即参数 J 变化对其不产生影响,下文分析不考虑以上特征根。

如图3(b)所示为特征根15~29。特征根15、16开始为两不等负实根,呈现过阻尼特性,随着转动惯量增大,此对特征根向右移动并离开实轴变为共轭复根,虚部绝对值存在一个先变大后变小的过程,阻尼和振荡频率随之变化。我们通过控制使d-q坐标下逆变器

物理结构、有功无功功率解耦,但状态方程里的中间变量仍存在耦合,在这里,特征根17、18、19、20、21总有两个为共轭复根,它们离虚轴最近,变化趋势连贯,实部向右,虚部减小,阻尼比降低。其他特征根在实轴移动,始终没有越过虚轴进入右半平面。实部越小,系统稳定时间越短,振幅越小。监测小信号模型中的变量结果,可以得到惯量阈值,由上面特征根轨迹变化分析可知, J 大于某一阈值会导致系统不稳定,而其继续增大,又会有回归稳定趋势。

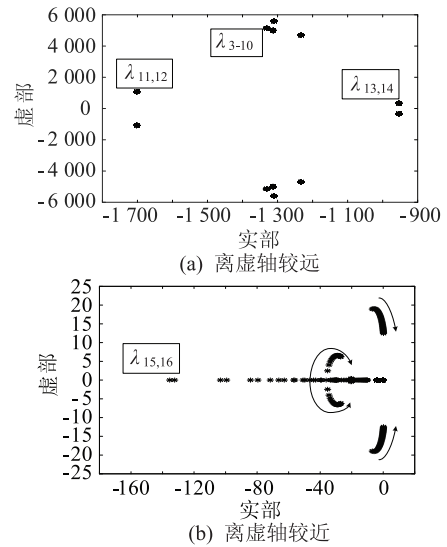


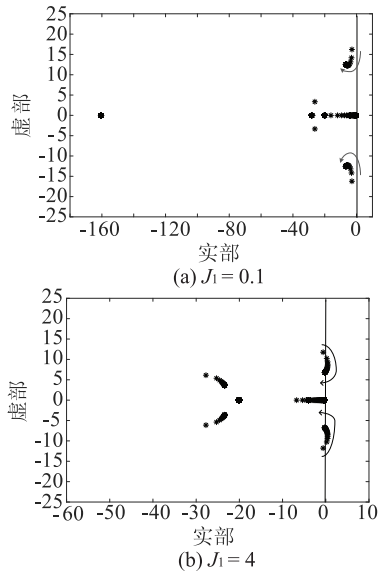
图3 参数 J 变化特征根轨迹图

Fig. 3 Traces of eigenvalues when J changes

3.3 双机并联VSG的惯量匹配

相同容量VSG并联的情况前面已根据搭建的小信号模型有所论述,两机转动惯量完全一致,参数变化过程存在一个稳定阈值 J_s ,超出阈值会使特征根越过虚轴到达右半平面,低频特征根失稳,发起振荡,继续增大参数虽有回稳趋势却始终没有稳定,根轨迹参照图3, J 应在阈值以下取值,否则会导致系统不稳定,这也是传统转动惯量不能选取较大数值的本质原因。

实际上,相同容量VSG的转动惯量也不尽相同。两机转动惯量不一致时,固定 $J_1 < J_s$, J_2 逐渐变大,所有特征根实部均在虚轴左侧,如图4(a)所示,可保证系统稳定运行,并且 J 越小,稳定时间越短,共轭复根振荡频率先减小,后稍有增大。 $J_1 \geq J_s$ 时,与上一节类似,阻尼比随 J_2 的增大逐渐减小,特征根过渡到虚轴右侧,不同的是在 J_2 继续增大时,特征根实部会回归为负值,如图4(b)所示,系统重新稳定,起到间接扩大虚拟转动惯量范围的作用。

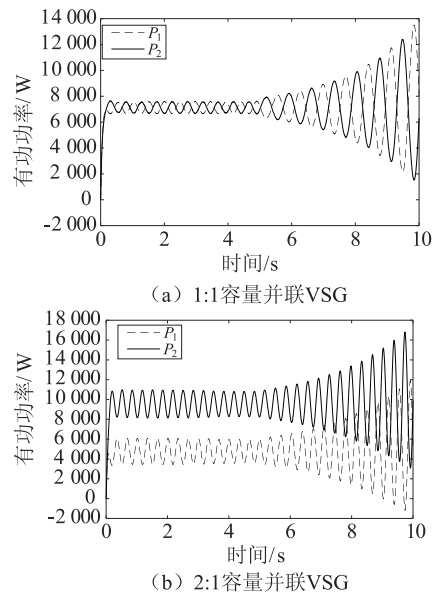
图4 变 J_2 特征根轨迹示例图Fig. 4 Sample diagram of variable J_2 characteristic root locus

两机容量不同时,这里以2:1容量VSG并联为例,按比例分配虚拟转动惯量并没有增大两机总惯量,所以这里仍借鉴前面分析方法。两机转动惯量完全一致并从小到大变化时,得到特征根轨迹类似图3,这里不再列出,影响系统稳定的主导特征根轨迹以及小信号稳定的取值原则与等容量并联时一样,所不同的是,由于两机容量存在差异,虚拟转动惯量 J 的稳定阈值被明显缩小,特征根会很快回归稳定平面。当然,一般不同容量VSG并联时,转动惯量也不同。两机转动惯量不一致, J_1 固定, J_2 从小到大变化,特征根轨迹与图4类似: $J_1 < J_s$ 时,所有特征根均在虚轴左侧,系统一直可稳定运行; $J_1 \geq J_s$ 时,特征根会逐渐过渡到虚轴右侧,系统不稳, J_2 继续增大,特征根很快变为负值,系统重新稳定。虚拟转动惯量在阈值以上取值避开不稳定区间也可保证系统稳定运行。而利用重新回稳的特征根来保证系统的稳定性的意义主要在于容量不同的情况,因为此时惯量阈值较小,传统的在阈值以下进行取值会大大缩减 J 的取值范围,削弱VSG性能,而如果容量相同的两机并联,再次回稳的 J_2 会比较大,系统的稳定时间也较长。

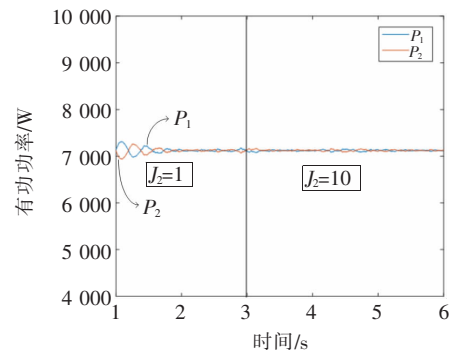
4 仿真与实验分析

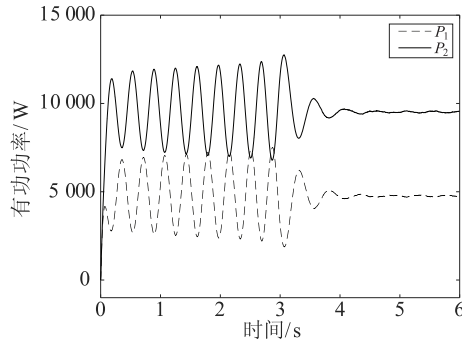
从小干扰稳定性的角度进行研究,以保证多机稳定运行为目的得到了并联VSG虚拟转动惯量 J 的匹配依据,下面通过如图1所示拓扑结构的时域仿真和实验对上述分析进行验证。

模型的非线性仿真结果如图5所示。在图5中,无论两机容量是1:1还是2:1,两机 J 一致。由小信号模型监测结果可知,算例中等容量VSG的 J_s 为1.4;不等容量VSG的 J_s 为0.4。开始时,虚拟转动惯量均取为稳定阈值 J_s ,稳态输出有功功率等幅振荡;5s时进行切换,同时少量增大虚拟转动惯量,开始振荡发散。可见虚拟转动惯量在达到阈值后,系统进入不稳定区域,逐渐振荡起来。

图5 $J_1 = J_2$ 时系统不稳定仿真图Fig. 5 Simulation diagram of system instability when $J_1 = J_2$

如图6、图7所示是两机参数不一致时的仿真图,图6中两机容量相同且 $J_1 < J_s$,输出有功一直是稳定的;图7中两机容量2:1, $J_1 > J_s$,3s前 $J_2 = 0.6$,之后 $J_2 = 5$,展示了两机转动惯量均较大时, J_2 继续变大越过不稳定区间,输出曲线重归稳定的过程。

图6 $J_1 < J_s$ 时输出有功Fig. 6 Output active power when $J_1 < J_s$

图7 $J_1 > J_s$ 时输出有功Fig. 7 Output active power when $J_1 > J_s$

实验结果如图8所示为相同容量波形,图9为不同容量波形,在实验中增加负荷的阶跃变化,并联50 Ω 的负载电阻,进一步验证稳定性分析的正确性,主要分为两个阶段:一组 J 参数下负荷突增再突减,换另一组 J 参数再对负荷部分进行相同大小的投切,由于篇幅所限这里只给出频率和有功功率波形说明对照。图8中初始状态下 $J_1 = 0.24, J_2 = 0.5$,经过负荷投切由频率及有功功率波形均可见其稳定;变虚拟惯量参数, $J_1 = 0.24, J_2 = 2$,再进行负荷投切调节过程的振荡增大,系统仍可稳定运行。图9中两台虚拟同步发电机容量比为2:1,这里观察越过不稳定区间后系统状态,初始时刻 $J_1 = 2, J_2 = 2$,负荷突增突减时有功功率轻微振荡后回归平衡点,变虚拟惯量参数, $J_1 = 4, J_2 = 4$,负荷投切时振荡时间变长,但是很明显仍能稳定运行。

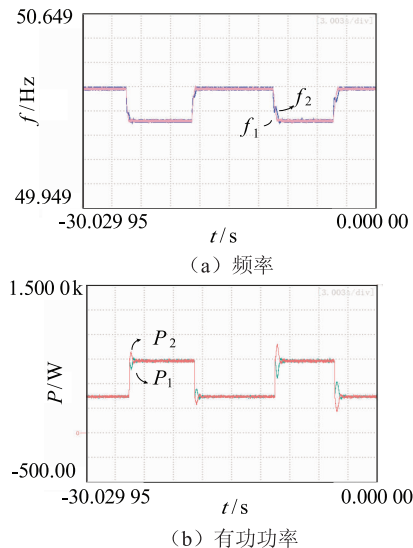
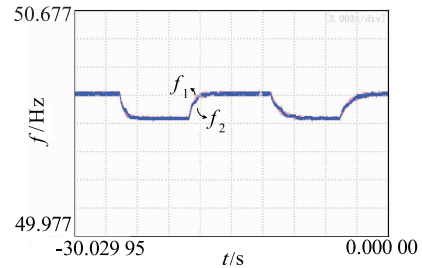
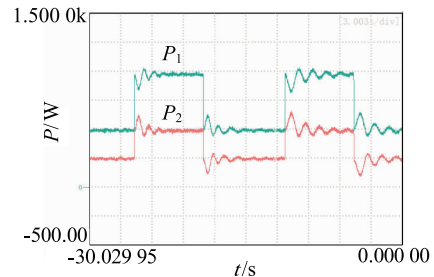


图8 等容量双机并联实验结果

Fig. 8 Experimental results of two-machine paralleled VSGs with equal capacity



(a) 频率



(b) 有功功率

图9 不等容量双机并联实验结果

Fig. 9 Experimental results of two-machine paralleled VSGs with different capacity

5 结束语

建立了具有同步发电机特性的逆变电源并联系统改进高阶小信号模型,从小信号稳定的角度对VSG进行研究,为自适应参数等策略下的虚拟转动惯量提供了参数选取依据,实现更灵活的调节。对于多台微电网电源采用VSG控制策略并联运行时由于虚拟转动惯量选取不当引起的功率振荡问题,以一个2机系统为例进行小信号分析,在不同工况下,根据惯量阈值确定参数调节范围,避开不稳定区间,能够抑制这种功率振荡,实现了2台虚拟同步发电机的并列运行,提高系统稳定性,通过不同参数下的仿真实验验证了分析结果的正确性。此模型对其它参数的选取也具有重要指导意义。

参考文献

- [1] Hassan Bevrani, Toshifumi Ise, Yushi Miura. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 54.
- [2] 石二微. 基于虚拟同步电机控制的微电网逆变器研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
Shi Erwei. The research of supervision system for stand-alone wind/photovoltaic generating station Research on microgrid inverter based on virtual synchronous generator control[D]. Qin Huangdao: Yan Shan University Master's Degree Thesis, 2014.
- [3] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 26-31, 36.
Du Wei, Jiang Qirong, Chen Jiaorui. Frequency control strategy of dis-

- tributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31, 36.
- [4] 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.
- [5] Arco S D, 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 and Energy Systems, 2015, 72.
- [6] 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 inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [7] 江浩, 刘辉, 王阳, 等. 虚拟同步发电机单机并网小信号模型及其稳定性分析[J]. 华北电力技术, 2017, (4): 55-60.
Jiang Hao, Liu Hui, Wang Yang, et al. Small-signal modelling and stability analysis of one virtual synchronous generator connected to the utility grid[J]. North China Electric Power Technique, 2017, (4): 55-60.
- [8] 颜湘武, 刘正男, 徐恒波, 等. 虚拟同步发电机特性的三相逆变器小信号建模及分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 1-8.
Yan Xiangwu, Liu Zhengnan, Xu Hengbo, et al. Small-signal modeling and mnalysis of three-phase characteristics of virtual synchronous generator[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2016, 43(3): 1-8.
- [9] 颜湘武, 刘正男, 张波, 等. 具有同步发电机特性的并联逆变器小信号稳定性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 910-917.
Yan Xiangwu, Liu Zhengnan, Zhang Bo, et al. Small-signal stability analysis of parallel inverters with synchronous generator characteristics[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 910-917.
- [10] 吕志鹏, 郭育华, 刘岚, 等. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器设计[J]. 电力电子技术, 2016, 50(12): 106-108.
Lv Zhipeng, Guo Yuhua, Liu Lan, et al. The design of micro connecting based on virtual synchronous generator[J]. Power Electronic Technology, 2016, 50(12): 106-108.
- [11] 张明锐, 黎娜, 杜志超, 等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19.
Zhang Mingrui, Li Na, Du Zhichao, et al. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2012, 32(25): 9-19.
- [12] 李清, 张彼德, 郭筱瑛, 等. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器控制研究[J]. 电测与仪表, 2015, (13): 11-15.

- Li Qing, Zhang Bide, Guo Xiaoying, et al. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, (13): 11-15.
- [13] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
Shi Qiaoming, Wang Gang, Fu Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 783-790.
- [14] 王瑞琪, 程艳, 孙树敏, 等. 基于坐标旋转虚拟阻抗的微电网控制与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 78-86.
Wang Ruiqi, Cheng Yan, Sun Shumin, et al. Control and performance analysis of microgrid based on coordinate rotational virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 78-86.
- [15] 王晓声, 江浩, 刘辉, 等. 虚拟同步发电机并网稳定性研究综述[J]. 华北电力技术, 2017, (9): 14-21.
Wang Xiaosheng, Jiang Hao, Liu Hui, et al. Review of the research on stability of virtual synchronous generator under grid-connected operation[J]. North China Electric Power Technique, 2017, (9): 14-21.

作者简介:



颜湘武(1965—),男,博士,教授,从事新能源电力系统分析与控制、现代电力变换、新型储能与节能技术研究。Email:xiangwuy@ncepu.edu.cn



王雨薇(1994—),女,硕士研究生,从事微网控制与分析研究。Email:yuweiw@ncepu@163.com



郭玉威(1993—),女,硕士研究生,从事电池技术研究。Email:guoyw@ncepu@163.com

贾焦心(1991—),男,博士研究生,从事电力变换器控制和微电网研究。
Email:jiajx33@163.com
刘正男(1990—),男,硕士,从事新能源电力系统研究。
Email:liu_zhengnan@163.com

收稿日期:2018-08-22;修回日期:2018-11-11
(田春雨 编发)