

虚拟同步发电机多机并联系统的频率 小信号稳定性分析研究

曾德银, 姚骏*, 张田, 孙鹏, 刘凯, 裴金鑫

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Research on Frequency Small-signal Stability Analysis of Multi-parallel Virtual Synchronous Generator-based System

ZENG Deyin, YAO Jun*, ZHANG Tian, SUN Peng, LIU Kai, PEI Jinxin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology

(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Different from the single virtual synchronous generator(VSG)-based grid-connected systems, the multi-parallel VSG-based grid-connected systems have more complex interactions between devices. Consequently, the traditional analysis method cannot analyze the dynamic stability performance of the system accurately. In order to study the frequency characteristics of the VSGs and power grid, this paper firstly derived the general small-signal model of the multi-machine parallel VSG-based system. Secondly, combined with the participation factor locus of the state variables of the system eigenvalues, the influences of the line impedance, the output power and the parameters of the active control loop on the eigenvalues of the low frequency band were analyzed in detail. In this way, the influence of parameters on the frequency of VSGs and power grid were obtained. Finally, the correctness of the investigated influence law on the system frequency stability was verified by simulation under different working conditions.

KEY WORDS: virtual synchronous generator(VSG); multi-parallel system; frequency stability; small-signal model; participation factor

摘要: 不同于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)单机并网系统, VSG多机并网系统中各设备间有着更为复杂的相互作用关系, 所以仅利用传统的分析方法很难准确地分析出系统的动态性能。为了分析 VSG 本体、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网之间的频率特性, 该文首先推

导 VSG 多机并网系统的通用小信号模型。其次, 结合系统特征根主导状态变量的参与因子运动轨迹, 详细地分析线路连接阻抗、输出功率大小和有功控制环参数等因素对系统低频特征根的影响关系, 以此得出系统参数对 VSG 本体、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网之间的频率影响规律。最后, 在不同工况下通过仿真验证该文所得系统频率稳定性影响规律的正确性。

关键词: 虚拟同步发电机; 多机并联系统; 频率稳定性; 小信号模型; 参与因子

0 引言

随着风力发电、光伏发电等可再生能源技术的不断发展, 越来越多的可再生能源通过电力电子装置接入电网。对于光伏发电和基于永磁直驱的风力发电等新能源发电系统, 其依靠并网逆变器将可再生能源接入电网, 由于并网逆变器的开关速度快, 控制灵活, 在电能质量优化和智能电网建设等方面具有明显优势^[1-2]。但是, 随着依托电力电子装置并网的可再生能源发电系统在电力系统中的占比逐渐增大^[3-4], 电力电子装置本身的低惯性、低阻尼、离散化等特性变得不可忽略, 在系统出现功率扰动时可能导致系统电压和频率的失稳, 严重影响电力系统的安全稳定运行和供电可靠性^[5]。

针对上述问题, 有学者提出虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的概念^[6]。虚拟同步发电机的思想是将同步发电机的数学方程引入到逆变器的控制算法中, 模拟同步发电机的惯量、阻尼等输出特性, 并可以像同步发电机一样参与电网的调频与调压。然而, VSG 虽然具有一定的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977019, U1966208); 国家重点研发计划项目(2017YFB0902000)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51977019, U1966208); National Key R&D Program of China(2017YFB0902000).

惯性和阻尼，但其在遭受扰动时也可能出现频率或功率波动，且由于 VSG 本身属于电力电子设备，其抗扰动能力远不及传统同步发电机。为优化 VSG 系统的频率特性，提高 VSG 设备的安全性能，国内外学者对 VSG 的模型优化和参数设计等方面进行大量的研究，并实现工程上的应用^[7]。文献[8]通过引入虚拟转子、虚拟一次调频控制器和虚拟二次调频控制器的概念，提出一种强鲁棒性的 VSG 控制方法，对虚拟参数进行优化调整，最终实现对系统频率的稳定控制，并通过微电网实验平台验证所提出的控制方法的有效性。文献[9-10]从复频域角度推导 VSG 单机系统小信号模型，探讨 VSG 虚拟惯量的最大取值边界和主控参数对系统频率稳定性的影响规律，为控制参数的选择提供依据。但对于多机系统，基于传递函数的小信号模型将会十分复杂且不利于分析。文献[11]针对 VSG 单机并网系统，从状态空间的角度建立高阶小信号模型，虽然能准确描述单机系统的动态特性，但由于模型的阶数较高，使其难以扩展到多机系统的建模和分析中。文献[12-14]针对 VSG 并网系统输出功率和频率出现同步频率振荡和低频振荡问题，分析系统的振荡机理，并分别提出抑制振荡的控制策略。文献[15-17]详细分析参数对 VSG 系统的频率稳定性的影响规律，并提出对应的参数优化控制策略，在提高 VSG 系统的频率稳定性方面具有显著的效果。文献[18-19]针对 VSG 双机并联系统，推导 VSG 双机并联小信号模型，分析参数对系统的影响规律，并分别提出惯量匹配控制策略以及参数自优化控制策略以提高系统频率稳定性能，但其分析过程中认为 2 台 VSG 参数相同且按相同规律变化，所以并未考虑 2 台 VSG 参数不同条件下 VSG 间的相互作用规律。

基于以上对 VSG 频率稳定性的研究可以发现，大部分文献都针对 VSG 单机系统的控制器设计和建模以及参数自适应优化等内容进行研究与分析。而研究双机并联系统的文献也仅考虑 2 台 VSG 参数相同的情况，而忽略 VSG 参数不同条件下的并联 VSG 之间的相互作用。若实际可再生能源发电基地的各并网逆变器均采用 VSG 控制，则研究 VSG 本身、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网之间的频率稳定机理及其参数影响规律就具有重要的理论意义。

本文针对 VSG 多机并联并网系统，结合传统的 VSG 控制结构，选择合适的状态变量，从状态

空间的角度推导并建立 VSG 多机并联并网系统的通用小信号模型，同时结合系统特征根主导状态变量的参与因子运动轨迹，详细分析系统参数对系统低频特征根的影响关系，从而得到系统参数对 VSG 本体、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网之间的频率稳定性影响规律，为 VSG 多机并联并网系统的控制参数选择和系统频率的优化控制提供理论依据。最后利用仿真验证本文分析方法和所得影响规律的正确性。

1 VSG 基本原理

1.1 VSG 系统拓扑结构

典型的 VSG 单机并网系统拓扑结构如图 1 所示。可再生发电单元经过能量转换以及电能变换后汇入直流母线，再经过采用 VSG 控制算法的并网逆变器、LCL 滤波器、变压器以及传输线路等结构并入交流电网。

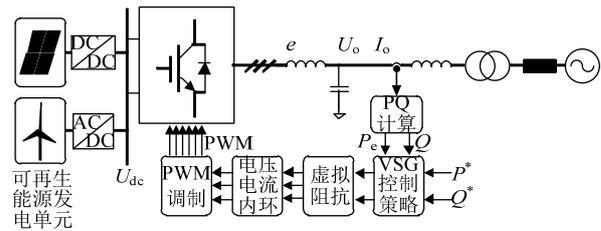


图 1 VSG 系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of VSG system

1.2 VSG 控制策略

图 2 为传统的 VSG 功率外环控制框图^[14]。图中 ω_n 为系统额定角频率； ω 为 VSG 虚拟角频率； P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率给定； P_e 和 Q 为系统输出有功功率和无功功率测量值； J 为系统虚拟转动惯量； D 为系统虚拟阻尼系数； K_ω 为有功调频系数； K_q 为无功调压系数； U_{ref} 为电压幅值给定； E 和 θ 分别为功率外环输出的参考电压的幅值和相位。外环输出的参考电压经虚拟阻抗、电压电流内环控制以及正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulated, SPWM) 后，可得到用以驱动并网逆变器的脉宽调制 (pulse width modulated, PWM) 脉冲。

由图 2 可以得到虚拟同步发电机功率外环控制

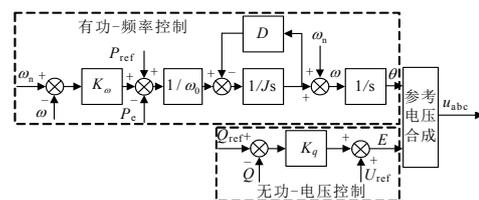


图 2 VSG 控制框图

Fig. 2 Block diagram of VSG controller

的数学表达式:

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} = \frac{P_{\text{ref}} + K_\omega (\omega_n - \omega) - P_c}{\omega_0} + D(\omega_n - \omega) \\ E = K_q (Q_{\text{ref}} - Q) + U_{\text{ref}} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知, VSG 的频率特性由有功-频率控制环参数决定, 具体包括 K_ω 、 J 和 D 。作为控制参数, J 和 D 与传统同步发电机的惯量和阻尼不同, 其值可根据系统状态实时改变, 以取得最优的控制效果^[17], 而有功调频系数 K_ω 则用于模拟同步发电机的一次调频特性, 取值大小由自身容量和电网调控决定^[20]。

2 VSG 多机并联并网系统小信号建模

图 1 仅给出单台 VSG 并网的系统结构图, 实际风电场或者光伏电站通常是多机并联结构, 各逆变器经过连接线路汇入到公共连接点 (point of common coupling, PCC), 再经传输线路并入电网。为简化分析, 本文考虑了变压器漏感等因素, 将系统各参数统一折算到变压器低压侧, 得到如图 3 所示的 VSG 多机并联并网系统等效拓扑结构图。图中的参数均在 dq 旋转坐标系下表示。其中 e_{dq_i} 为第 i 台 VSG 的端口电压; u_{odq_i} 、 i_{odq_i} 分别为第 i 台 VSG 的输出电压和电流; u_{bdq} 为 PCC 点电压; L_{fi} 和 C_{fi} 为第 i 台 VSG 的 LC 滤波器的滤波电感和滤波电容; R_{fi} 是第 i 台 VSG 的 LC 滤波器的等效电阻; R_{ei} 和 L_{ei} 为考虑变压器漏感条件下第 i 台 VSG 与 PCC 点处的等效连接电阻和等效连接电感; R_g 和 L_g 分别为传输线路的等效电阻和等效电感。

由于本文主要研究 VSG 多机并联并网系统的频率稳定性, 为方便分析, 在进行小信号建模时忽略了部分与频率响应不在同一时间尺度的因素, 具体包括逆变器的开关延时、电压电流内环控制以及功率计算时的低通滤波。即在机电时间尺度下通过分析系统的外特性来研究 VSG 多机并联系统的频

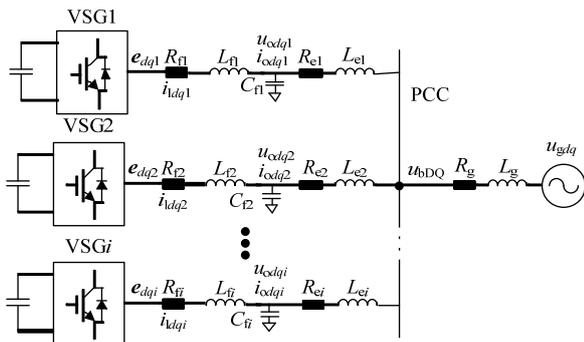


图 3 VSG 多机并联系统拓扑结构

Fig. 3 Topology of multi-parallel VSG system

率稳定性。

2.1 参考坐标系与坐标变换

为方便分析, 在进行 VSG 多机系统小信号建模时, 需要将所有并联的 VSG 变换到同一坐标系下, 本文选取第一台 VSG 的 dq 坐标系作为公共参考 DQ 坐标系, 如图 4 所示, 则第 i 台 VSG 与第 1 台 VSG 的输出电压角度 δ_i 为:

$$\delta_i = \int (\omega_i - \omega_1) dt \quad (2)$$

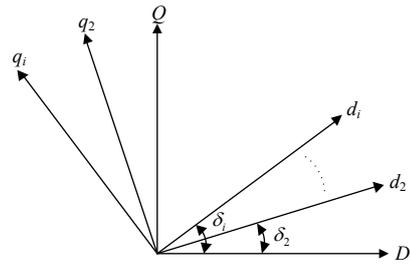


图 4 多机并联系统 dq 坐标系示意图

Fig. 4 dq frame system of multi-parallel system

线性化后的小信号模型为如下所示。

$$\Delta \dot{\delta}_i = \Delta \omega_i - \Delta \omega_1 \quad (3)$$

式中: δ 表示该参数的小扰动量; \dot{x} 表示该参数的微分。

在建立 VSG 多机并联并网系统小信号模型时, 需将第 i 个 VSG 控制的逆变器输出电流 i_{odq_i} 变换到 DQ 坐标系下, 变换方法如下:

$$\begin{cases} i_{oDi} = i_{odi} \cos \delta_i - i_{oqi} \sin \delta_i \\ i_{oQi} = i_{odi} \sin \delta_i + i_{oqi} \cos \delta_i \end{cases} \quad (4)$$

线性化后的小信号模型如下:

$$\Delta i_{oDQi} = \mathbf{T}_{si} \Delta i_{odqi} + \mathbf{T}_{ci} \Delta \delta_i \quad (5)$$

矩阵详细参数见附录 A 所示。

同理, 将各 VSG 的并联 PCC 点处节点电压 u_{bdq} 变换到各 VSG 坐标系下, 表示如下:

$$\Delta u_{odqi} = \mathbf{T}_{si}^{-1} \Delta u_{bdq_i} + \mathbf{T}_{ui}^{-1} \Delta \delta_i \quad (6)$$

2.2 功率控制环小信号建模

在 VSG 自身 dq 坐标系下, 分别对式(1)的有功-频率控制方程和无功-电压控制方程进行线性化, 可得 VSG 功率外环小信号模型, 如下式所示。

$$\Delta \dot{\omega} = \left(\frac{-D\omega_0 - K_\omega}{J\omega_0} \right) \Delta \omega - \frac{1}{J\omega_0} \Delta P_c \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta E_d = -K_q \Delta Q \\ \Delta E_q = 0 \end{cases} \quad (8)$$

VSG 输出功率反馈由采集的输出电压 u_{odq} 与输出电流 i_{odq} 经瞬时功率计算后得到:

$$\begin{cases} P_e = 1.5(u_{od}i_{od} + u_{oq}i_{oq}) \\ Q = 1.5(u_{oq}i_{od} - u_{od}i_{oq}) \end{cases} \quad (9)$$

对上式进行线性化可得功率反馈小信号模型：

$$\begin{cases} \Delta P_e = 1.5(\Delta u_{od}I_{od} + U_{od}\Delta i_{od} + \Delta u_{oq}I_{oq} + U_{oq}\Delta i_{oq}) \\ \Delta Q = 1.5(\Delta u_{oq}I_{od} + U_{oq}\Delta i_{od} - \Delta u_{od}I_{oq} - U_{od}\Delta i_{oq}) \end{cases} \quad (10)$$

结合式(7)、(8)、(10)，可整理得到 VSG 功率环的小信号模型，其标准形式如下：

$$[\Delta \dot{\omega}] = \mathbf{A}_P[\Delta \omega] + \mathbf{B}_P \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta E_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{P\omega} \\ \mathbf{C}_{PE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta E_{dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{P\omega} \\ \mathbf{D}_{PE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.3 滤波器与连接线路小信号建模

本文认为功率外环控制器的输出参考电压即为逆变器的输出端电压。结合图 3 所示的 VSG 拓扑结构，可得逆变器输出端的 LC 滤波器以及连接线路的数学模型，如下式所示。

$$\begin{cases} L_r \frac{di_{ld}}{dt} = -R_r i_{ld} + L_r \omega i_{lq} + E_d - u_{od} \\ L_r \frac{di_{lq}}{dt} = -R_r i_{lq} - L_r \omega i_{ld} + E_q - u_{oq} \\ C_f \frac{du_{od}}{dt} = C_f \omega u_{oq} + i_{ld} - i_{od} \\ C_f \frac{du_{oq}}{dt} = -C_f \omega u_{od} + i_{lq} - i_{oq} \\ L_c \frac{di_{od}}{dt} = -R_c i_{od} + L_c \omega i_{oq} + u_{od} - u_{bd} \\ L_c \frac{di_{oq}}{dt} = -R_c i_{oq} - L_c \omega i_{od} + u_{oq} - u_{bq} \end{cases} \quad (13)$$

对式(13)进行线性化，可得滤波器与连接线路的小信号模型：

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_{ldq} \\ \Delta \dot{u}_{odq} \\ \Delta \dot{i}_{odq} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_F \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{F1}[\Delta E_{dq}] + \mathbf{B}_{F2}[\Delta u_{bdq}] + \mathbf{B}_{F3}[\Delta \omega] \quad (14)$$

2.4 VSG 单机及多机并联系统小信号建模

本文以第 1 台 VSG 为公共参考坐标系，结合式(3)、(11)、(14)，可得第 i 台 VSG 在公共坐 DQ 标系下的小信号模型，如下式所示。

$$\begin{cases} [\Delta \dot{x}_{VSGi}] = \mathbf{A}_{VSGi}[\Delta x_{VSGi}] + \mathbf{B}_{VSGi}[\Delta u_{bdQi}] + \mathbf{B}_{\omega} \Delta \omega \\ \Delta i_{oDQi} = \mathbf{C}_{VSGi}[\Delta x_{VSGi}] \end{cases} \quad (15)$$

单台 VSG 系统状态变量如下所示：

$$[\Delta x_{VSGi}] = [\Delta \delta_i \quad \Delta \omega_i \quad \Delta i_{ldqi} \quad \Delta u_{odqi} \quad \Delta i_{odqi}]^T$$

由于式(15)是在公共坐标系下推导出的 VSG 单机小信号模型，所以可直接写出多台 VSG 并联系统的小信号模型，如下式所示。

$$\begin{cases} [\Delta \dot{x}_{VSG_P}] = \mathbf{A}_{VSG_P}[\Delta x_{VSG_P}] + \mathbf{B}_{VSG_P}[\Delta u_{bdQ}] \\ [\Delta i_{oDQ_P}] = \mathbf{C}_{VSG_P}[\Delta x_{VSG_P}] \end{cases} \quad (16)$$

2.5 输电线路和无穷大电网小信号模型

在小干扰下，可认为电网电压的幅值 E_g 和频率 ω_g 为恒定值。则电网电压与参考 VSG 输出电压的相位差 δ_g 满足以下方程：

$$\dot{\delta}_g = \omega_g - \omega_1 \quad (17)$$

将电网电压变换到公共坐标系下有：

$$\begin{cases} \Delta u_{gD} = E_g \sin \delta_{g0} \Delta \delta_g \\ \Delta u_{gQ} = -E_g \cos \delta_{g0} \Delta \delta_g \end{cases} \quad (18)$$

结合图 3，可得到 PCC 点与无穷大电网之间的电路方程如下所示，其中 i_{gDQ} 表示公共 DQ 坐标系下流经输电线路的总电流。

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{gD}}{dt} = -R_g i_{gD} + L_g \omega i_{gQ} + u_{bD} - u_{gD} \\ L_g \frac{di_{gQ}}{dt} = -R_g i_{gQ} - L_g \omega i_{gD} + u_{bQ} - u_{gQ} \end{cases} \quad (19)$$

结合式(18)，分别对式(17)、(19)进行线性化可得输电线路以及无穷大电网的小信号模型：

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{i}_{gDQ}] &= \mathbf{A}_g[\Delta i_{gDQ}] + \mathbf{B}_{g1}[\Delta u_{bdQ}] + \\ &\quad \mathbf{B}_{g2} \Delta \omega_1 + \mathbf{B}_{g3}[\Delta \delta_g] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\Delta \dot{\delta}_g = -\Delta \omega_1 = \mathbf{B}_{g\omega} \Delta \omega_1 \quad (21)$$

2.6 VSG 多机并联并网系统小信号建模

基于上文推导的 VSG 多机并联系统小信号模型、输电线路小信号模型以及无穷大电网小信号模型，整合可得 VSG 多机并联并网系统小信号模型。因此，为消除式(16)和式(20)中并网节点的节点电压 Δu_{bdQ} ，本文引入虚拟对地电阻 R_{VN} ，如果 R_{VN} 足够大，则可忽略 R_{VN} 对系统的影响，同时可将以上几部分模型统一。引入虚拟对地电阻后 PCC 点处的节点方程如下所示。

$$\begin{cases} u_{bD} = R_{VN}(i_{oD1} + i_{oD2} + \dots + i_{oDi} - i_{gD}) \\ u_{bQ} = R_{VN}(i_{oQ1} + i_{oQ2} + \dots + i_{oQi} - i_{gQ}) \end{cases} \quad (22)$$

对上式进行线性化, 可得:

$$[\Delta u_{\text{bdQ}}] = \mathbf{B}_{\text{VNO}}[\Delta i_{\text{odQ,P}}] + \mathbf{B}_{\text{VNG}}[\Delta i_{\text{gDQ}}] \quad (23)$$

联立式(16)、(20)、(21)和(23), 可得 VSG 多机并联并网系统的通用小信号模型, 如下所示。

$$[\Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{sys}}] = \mathbf{A}_{\text{sys}}[\Delta \mathbf{x}_{\text{sys}}] \quad (24)$$

其中:

$$[\Delta \mathbf{x}_{\text{sys}}] = [\Delta x_{\text{VSG,P}} \quad \Delta i_{\text{gDQ}} \quad \Delta \delta_{\text{g}}]$$

2.7 VSG 三机并联并网系统小信号模型

为分析 VSG 本体、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网之间的频率稳定性规律, 基于 2.6 节推导的 VSG 多机并联并网系统通用小信号模型, 以 VSG 并联数 $i=3$ 为例, 其他 VSG 并联数同理, 可得 VSG 三机并联并网系统小信号模型, 状态变量如下所示。

$$[\Delta \mathbf{x}_{\text{sys}}] = [\Delta \delta_1 \Delta \omega_1 \Delta i_{\text{ldq1}} \Delta u_{\text{odq1}} \Delta i_{\text{odq1}} \Delta \delta_2 \Delta \omega_2 \Delta i_{\text{ldq2}} \Delta u_{\text{odq2}} \Delta i_{\text{odq2}} \Delta \delta_3 \Delta \omega_3 \Delta i_{\text{ldq3}} \Delta u_{\text{odq3}} \Delta i_{\text{odq3}} \Delta i_{\text{gDQ}} \Delta \delta_{\text{g}}]^T \quad (25)$$

本文选取的容量基值 S_b 和电压基值 U_b 分别为 5MW 和 563V, 频率基值 f_b 为 50Hz。有功调频系数 K_ω 和无功调压系数 K_q 的标幺值如表 1 所示, 为更加清晰地体现出不同参数下 VSG 各状态变量与小信号模型特征根的对号关系, 特将各 VSG 初始参数设置成不同。根据表 1 的系统参数, 可得到系统的特征根分布表, 如表 2 所示。

由表 2 可知, 此工况下的 VSG 三机并联并网系统的所有特征根都位于坐标系左半平面, 系统在小干扰下是稳定的。此外, 系统的所有特征根分布可以分为高频段、中频段和低频段。其中高中频段与系统的输出电压和输出电流相关, 主要受输电线路、LC 滤波器等参数影响, 而低频段则与电网频率以及各 VSG 的频率相关, 主要受功率控制环的

表 1 系统参数

Tab. 1 The parameters of system

	VSG1	VSG2	VSG3		
P_{ref1}	1.0pu	P_{ref2}	1.0pu	P_{ref3}	0.5pu
Q_{ref1}	0.0pu	Q_{ref2}	0.0pu	Q_{ref3}	0.0pu
R_{f1}	0.092pu	R_{f2}	0.092pu	R_{f3}	0.092pu
C_{f1}	0.408pu	C_{f2}	0.408pu	C_{f3}	0.408pu
L_{f1}	0.065pu	L_{f2}	0.065pu	L_{f3}	0.065pu
R_{e1}	0.158pu	R_{e2}	0.316pu	R_{e3}	0.474pu
L_{e1}	0.08pu	L_{e2}	0.16pu	L_{e3}	0.24pu
J_1	360kg·m ²	J_2	432kg·m ²	J_3	180kg·m ²
D_1	51	D_2	51	D_3	25.5
$K_{\omega 1}$	70.4	$K_{\omega 2}$	56.3	$K_{\omega 3}$	35.2
K_{q1}	0.45	K_{q2}	0.45	K_{q3}	0.23

表 2 特征根分布

Tab. 2 Distribution of eigenvalues

特征根	实部	虚部	振荡频率/Hz	阻尼比	主导状态变量
λ_{1-2}	-281	±2325	370.1	0.12	$u_{\text{odq1}}, i_{\text{ldq1}}, i_{\text{odq1}}$
λ_{3-4}	-235	±1876	298.5	0.12	$u_{\text{odq2}}, u_{\text{odq3}}, i_{\text{ldq2}}$
λ_{5-6}	-268	±1680	267.4	0.16	$u_{\text{odq1}}, i_{\text{ldq1}}, i_{\text{odq1}}$
λ_{7-8}	-111	±1437	228.7	0.08	$u_{\text{odq3}}, i_{\text{ldq3}}$
λ_{9-10}	-224	±1269	202.0	0.17	$u_{\text{odq3}}, i_{\text{ldq3}}$
λ_{11-12}	-90	±816	129.9	0.11	$u_{\text{odq2,3}}, i_{\text{ldq2,3}}$
λ_{13-14}	-48689	±399	63.5	1	$i_{\text{gdq}}, i_{\text{odq1,2,3}}$
λ_{15-16}	-251	±332	52.8	0.60	$i_{\text{odq3}}, i_{\text{ldq3}}, i_{\text{gdq}}$
λ_{17-18}	-198	±329	52.4	0.52	$i_{\text{odq2}}, i_{\text{gdq}}, i_{\text{ldq2}}$
λ_{19-20}	-158	±291	46.4	0.48	$i_{\text{ldq1}}, i_{\text{odq1}}, i_{\text{gdq}}$
λ_{21-22}	-3.9	±6.9	1.1	0.49	$\delta_{\text{g}}, \omega_1, \omega_2, \omega_3$
λ_{23-24}	-4.0	±8.5	1.4	0.42	$\delta_2, \omega_3, \omega_1$
λ_{25-26}	-3.1	±5.3	0.8	0.51	$\delta_2, \omega_2, \omega_1$
λ_{27}	0	0	0	-	δ_1

参数影响。低频段的特征根表征了 VSG 系统的频率稳定特性, 所以本文只对系统低频段的特征根进行分析。根据小信号模型定义, δ_{g} 用以表征电网与 VSG 间频率的相互作用; δ_2 、 δ_3 用于表征 VSG 间频率的相互作用, ω_2 、 ω_3 用以表征各 VSG 自身的频率特性, 由于本文以 VSG1 作为参考, 所以 δ_1 恒为零。

3 系统频率稳定性分析

基于 2 节推导出的 VSG 多机并联并网系统小信号模型, 为更加准确的分析参数变化下特征根与系统状态变量之间的关系, 本文引入参与因子变量 p_{ki} , 其表达式如下。

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_{kk}} = \psi_{ik} \phi_{ki} \quad (26)$$

式中: ψ_{ik} 、 ϕ_{ki} 分别为系统正规化后的左右特征向量元素; p_{ki} 为状态变量对特征根的参与程度^[21]。

3.1 VSG 连接阻抗对系统频率稳定性的影响

对于实际的风电场或光伏电站, 每台并网逆变器与并网点连接线路(本文定义为连接阻抗 Z_{ei} , $Z_{ei}=R_{ei}+j\omega L_{ei}$)是各不相同的。为方便分析, 本文所有分析都基于三机并联并网小信号模型, 所有工况中各 VSG 的初始参数相同, 且输出 1pu 有功功率。设置 VSG1 连接阻抗为参考值 Z_{e1} , 其标幺值为 0.177pu。仅将 VSG3 的连接阻抗 Z_{e3} 从 $0.1Z_{e1}$ 增加到 $4Z_{e1}$, 可以得到此场景下系统的特征根根轨迹以及各状态变量的参与因子运动轨迹, 如图 5 所示。

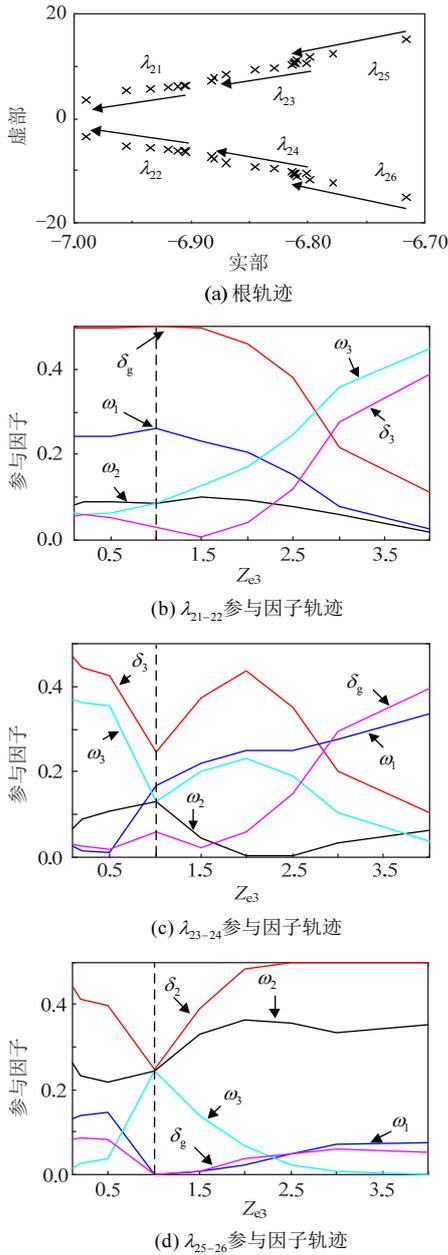


图 5 不同 Z_{e3} 下的系统根轨迹和参与因子轨迹

Fig. 5 Root locus and participation factor locus with different Z_{e3}

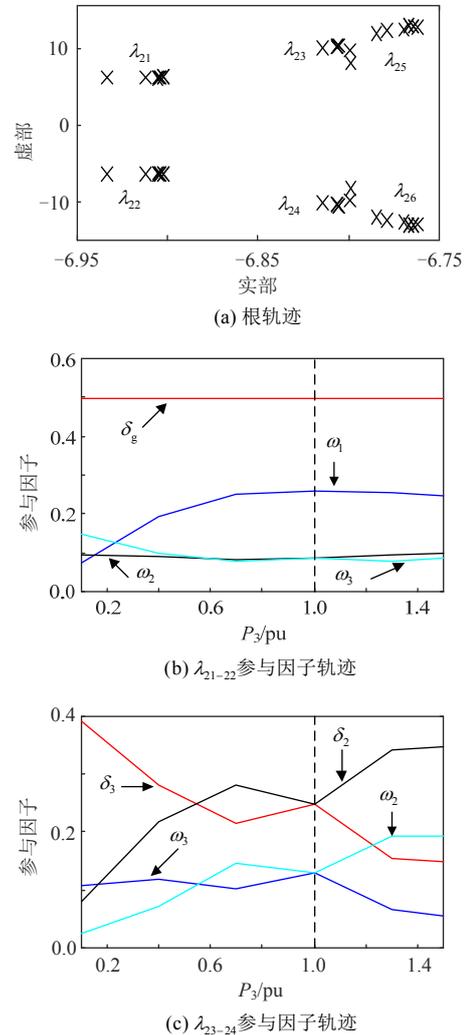
由图 5(d)可知，随着 Z_{e3} 的逐渐增大，振荡模式 λ_{25-26} 的主导状态变量始终为 δ_2 、 ω_2 ，结合图 5(a)， λ_{25-26} 向坐标系左下侧移动且速度逐渐减缓，阻尼小范围增加，自然振荡频率减小，VSG2 自身输出频率以及其与参考 VSG 频率差的稳定性变好，但并不明显。由图 5(b)、(c)可知，随着 Z_{e3} 的增大，振荡模式 λ_{21-22} 和 λ_{23-24} 的主导状态变量发生互换， λ_{21-22} 最终的主导状态变量为 δ_3 、 ω_3 ， λ_{23-24} 最终的主导状态变量为 δ_g 。结合图 5(a)，振荡模式 λ_{21-22} 和 λ_{23-24} 都向坐标系左下侧移动，阻尼增加，自然振荡频率降低。但 λ_{21-22} 的移动速度逐渐加快， λ_{23-24} 的移动速度减缓，说明 Z_{e3} 的增大可以明显提高

VSG3 自身输出频率以及其与参考 VSG 频率差的阻尼，且减小其振荡频率，同时也可在一定程度上提高电网的频率稳定性。

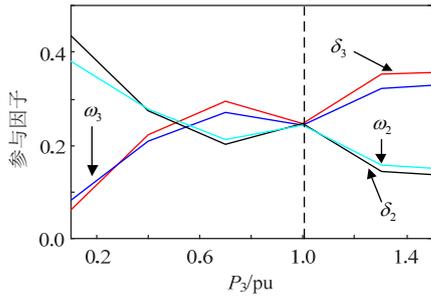
基于以上分析，对于 VSG 多机并联并网系统，连接阻抗 X_{ei} 将为 VSG 并联系统提供阻尼，且离 X_{ei} 越近的 VSG，连接阻抗提供的阻尼效果越明显。在出现外部扰动时， X_{ei} 越大，VSGi 的输出频率 ω_i 以及电网频率的振荡衰减速度越快，振荡幅值越小，VSGi 与参考 VSG 的频率差振荡衰减速度越快。同时，其他 VSG 输出频率以及其与参考 VSG 频率差的稳定性也会得到一定程度地改善。所以，考虑每台 VSG 与 PCC 点的连接阻抗差异，可使各 VSG 达到更为理想的控制效果。

3.2 VSG 输出功率对系统频率稳定性的影响

同样的，为分析 VSG 输出功率差异(本文定义为 P_i)对各研究对象的影响关系，将 VSG3 的输出有功 P_3 从 0.1pu 增加到 1.5pu，可以得到此工况下系统低频段特征根根轨迹以及各状态变量的参与因子变化轨迹，如图 6 所示。



(c) λ_{23-24} 参与因子轨迹



(d) λ_{25-26} 参与因子轨迹

图6 不同 P_3 下的系统根轨迹和参与因子轨迹
Fig. 6 Root locus and participation factor locus with different P_3

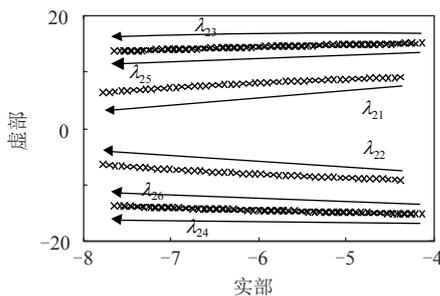
由图6可知,随着VSG3输出功率的逐渐增大,振荡模式 λ_{21-22} 的主导状态变量始终为 δ_g ,振荡模式 λ_{23-24} 和 λ_{25-26} 的主导状态变量发生互换。结合图6(A)可知,各振荡模式的运动范围较小且无明显规律,说明 P_3 的变化对各振荡模式的阻尼和自然振荡频率影响较小,对系统的频率稳定性影响较小。

3.3 VSG有功环控制参数同时改变对系统频率稳定性的影响

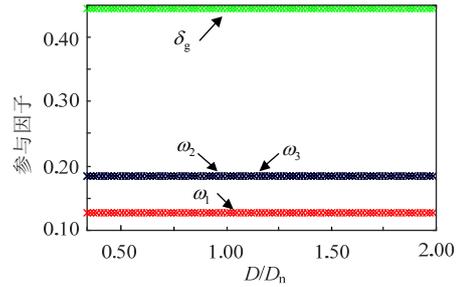
由于本文讨论的是系统的频率稳定性,所以仅对VSG的有功-频率控制环参数进行讨论,具体包括虚拟惯量 J ,虚拟阻尼 D 以及有功调频系数 K_ω 。以同时改变 D 为例,设置VSG1的虚拟阻尼系数为参考值 D_n 。同时将每台VSG的虚拟阻尼 D 从 $0.33D_n$ 增大到 $2.0D_n$,系统低频段根轨迹和振荡模式的参与因子轨迹如图7所示。本文所有分析皆以表1中VSG1有功环控制参数作为参考值,下文同理。

由图7(a)知,随着每台VSG的虚拟阻尼的增大,系统在低频段的所有振荡模式都向坐标系左侧移动,阻尼比增大,所主导的状态变量稳定性变好。此外,每个振荡模式的主导状态变量的参与程度未发生明显变化,且VSG2和VSG3的输出频率(ω_2 和 ω_3)以及其与参考坐标系的相位差(δ_2 和 δ_3)的参与因子运动轨迹重合,即每台VSG对系统的振荡模式贡献程度相同。

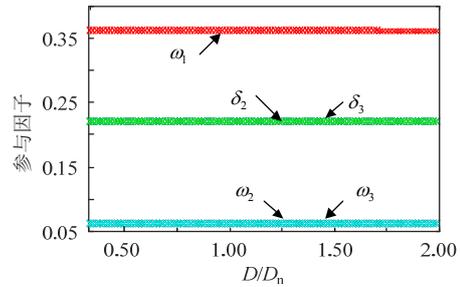
其他有功控制环参数同时改变时,由于分析方



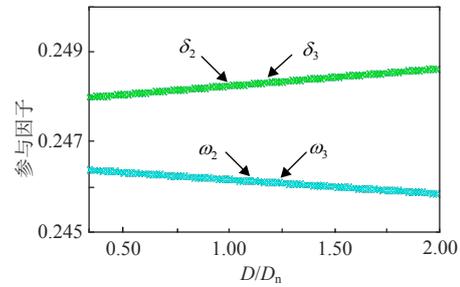
(a) 根轨迹



(b) λ_{21-22} 参与因子轨迹



(c) λ_{23-24} 参与因子轨迹



(d) λ_{25-26} 参与因子轨迹

图7 不同 D 下的系统根轨迹和参与因子轨迹

Fig. 7 Root locus and participation factor locus with different D

法类似,本文不再赘述,仅给出分析结果:若所有并联VSG的参数相同,扰动下各并联VSG间将没有相互作用,但同时减小虚拟阻尼、增大虚拟惯量以及减小有功调频系数,都会降低VSG自身的频率稳定性以及电网频率稳定性。具体表现为增大 J ,虽然可以提高系统惯性,但会导致频率响应变慢,扰动下各VSG的输出频率和电网频率的振荡时间都将变长。而减小 D 和 K_ω 都会减小系统阻尼比,频率响应变快。但阻尼比越小,扰动下VSG自身频率以及电网频率波动幅值越大,衰减速度越慢,不利于系统安全运行。

3.4 单台VSG外环控制参数变化对系统频率稳定性的影响

实际系统中各并联VSG的参数不可能完全相同,此时扰动下各并联VSG之间存在频率差。为研究各VSG在参数不同时对多机并联系统频率稳定性的影响规律以及影响程度,以虚拟阻尼系数差异为例,仅将VSG3的虚拟阻尼系数 D_3 从 $0.33D_n$.

增大到 $2.0D_n$ ，系统低频段根轨迹和低频振荡模式的参与因子轨迹如图 8 所示。在 VSG3 虚拟阻尼变化的过程中，振荡模式 λ_{23-24} 和 λ_{25-26} 参与因子运动轨迹在 D_3 为 $1D_n$ 附近时变化程度最大，如图 8(c) 中的参与因子骤变区域，详细变化趋势如图 9(a)、(b) 所示。

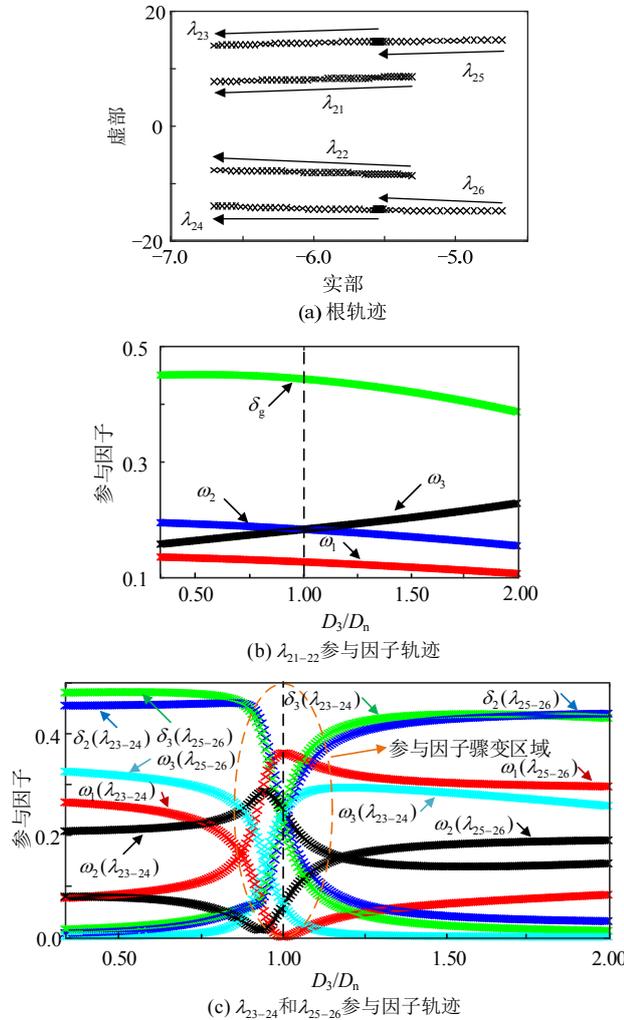


图 8 不同 D_3 下的系统根轨迹和参与因子轨迹

Fig. 8 Root locus and participation factor locus with different D_3

初始状态下各 VSG 参数相同且阻尼系数都为 D_n 。从图 8(b) 可以看出，在 D_3 从 $0.33D_n$ 增加到 $2.0D_n$ 的过程中，振荡模式 λ_{21-22} 始终主导电网与参考 VSG 间频率差的低频振荡模式，结合图 8(a) λ_{21-22} 始终向坐标系左侧移动，阻尼比增加，电网与参考 VSG 间的频率稳定性变好。

而对于 VSG 并联系统，在 D_3 逐渐接近 D_n 时，VSG2 和 VSG3 的输出频率的动态响应阻尼也会逐渐接近，当 $D_3=D_n$ 时，扰动下 VSG2 和 VSG3 的输出频率动态响应将完全相同。所以从图 8(c) 可以看出，当 D_3 逐渐接近 D_n 时，参与因子轨迹中状态变

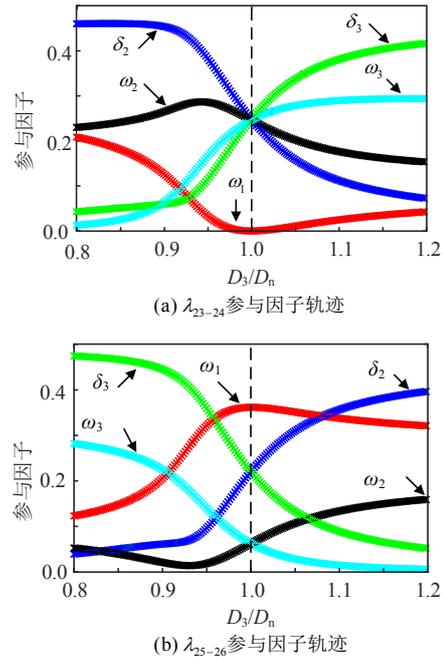


图 9 参与因子运动轨迹

Fig. 9 Participation factor locus

量 ω_2 和 ω_3 以及 δ_2 和 δ_3 的参与因子逐渐接近并在 $D_3=D_n$ 时相等，在 $D_3>D_n$ 时，振荡模式 λ_{21-22} 和 λ_{25-26} 所主导的状态变量发生互换。结合图 8(a)，在 D_3 逐渐增大时，振荡模式 λ_{25-26} 的根轨迹先向坐标系左侧移动并在 D_3 接近 D_n 时逐渐停止运动，振荡模式 λ_{23-24} 运动趋势与之相反。所以 ω_3 和 δ_3 参与因子较大的振荡模式的根轨迹会向坐标系左侧移动，VSG3 输出频率和其与参考 VSG 频率差的阻尼比增大，稳定性变好。而 ω_2 和 δ_2 参与因子较大的振荡模式的根轨迹几乎不变。因此，在 D_3 的增大过程中，VSG3 的输出频率阻尼将先接近 VSG2 的输出频率阻尼并最终大于 VSG2 的输出频率阻尼。图 9 中所示的参与因子骤变区域表示了 VSG3 输出频率阻尼的变化过程。

综上所述，单独增加 VSG3 的虚拟阻尼系数，会提高 VSG3 输出端口频率的阻尼，受扰后将表现出 D_3 越大，VSG3 输出频率波动幅值越小，衰减速度越快。同时，由于 VSG3 自身输出频率的振荡衰减速度也决定了其与参考 VSG 的频率差的振荡衰减速度，所以增大 VSG3 的虚拟阻尼系数也会提高 VSG3 与参考 VSG 的频率差阻尼比，从而抑制了扰动下两台 VSG 间的有功环流。此外，扰动下增大 VSG3 的虚拟阻尼系数可提高 VSG 的输出频率稳定性，同时减缓电网与 VSG 间频率的相互作用，所以增大 D_3 也会间接的提高并网点处频率稳定性。但 VSG3 虚拟阻尼系数的变化并不会影响 VSG2 的

自身频率以及其与参考 VSG 频率差的动态特性。

基于以上分析方法，在其他控制参数变化时，系统的特征根根轨迹以及参与因子运动轨迹如图 10、11 所示。其中，图 10(a)为 VSG3 虚拟惯量 J_3 从 $0.5 J_n$ 增加到 $2.0 J_n$ 时的根轨迹图，图 10(b)、(c)、(d)为各振荡模式在参与因子骤变区域的参与因子轨迹。图 11(a)为 VSG3 有功调频系数 $K_{\omega 3}$ 从 $0.5 K_{\omega n}$ 增加到 $1.5 K_{\omega n}$ 时的根轨迹，图 11(b)、(c)、(d)

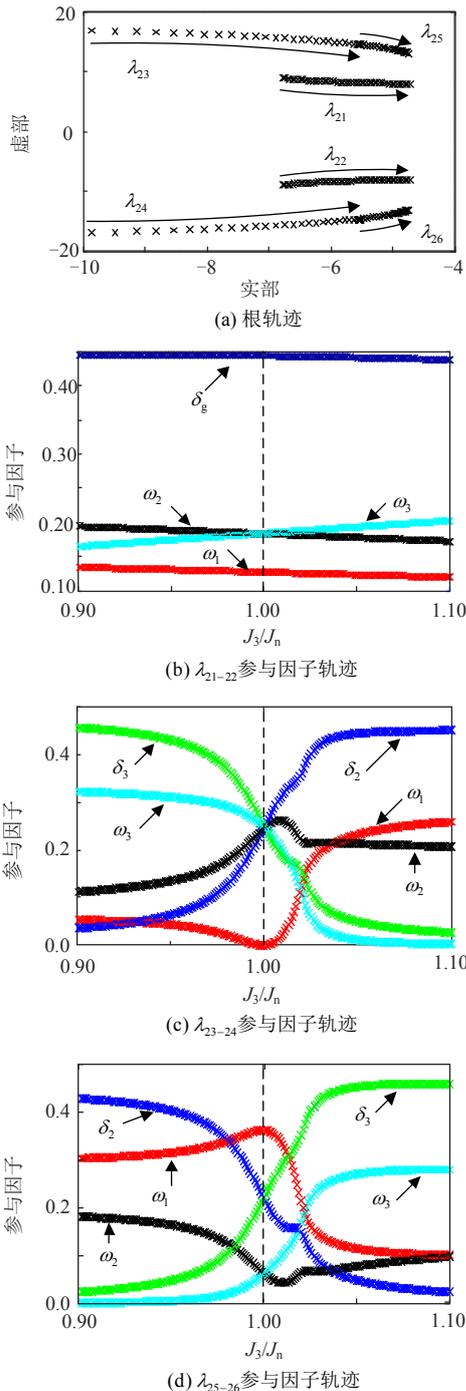


图 10 不同 J_3 下的系统根轨迹和参与因子轨迹
Fig. 10 Root locus and participation factor locus with different J_3

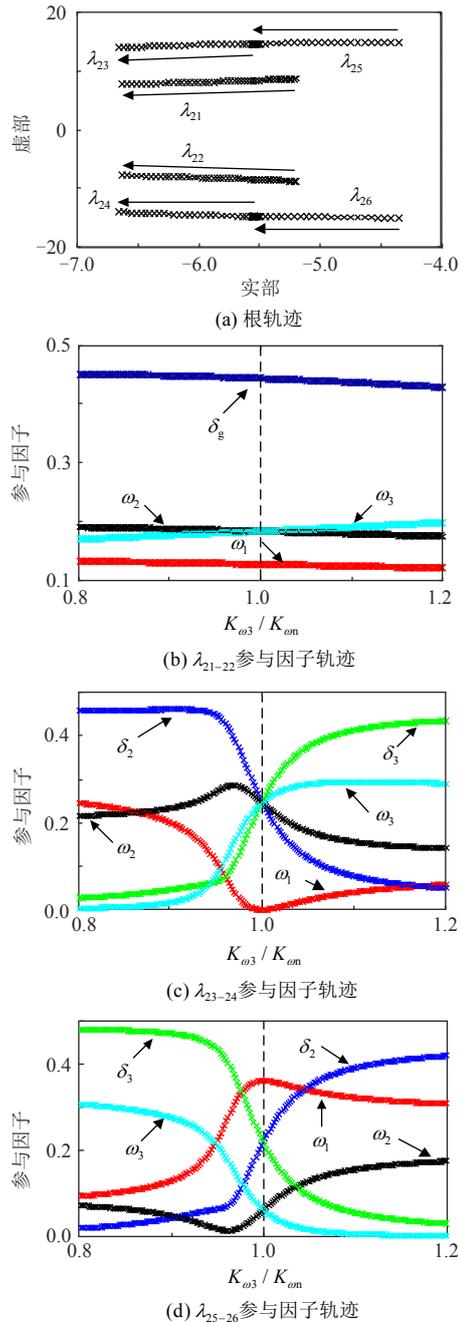


图 11 不同 $K_{\omega 3}$ 下的系统根轨迹和参与因子轨迹
Fig. 11 Root locus and participation factor locus with different $K_{\omega 3}$

为各振荡模式在参与因子骤变区域的参与因子轨迹。由于分析方法同理，针对 VSG 多机并联并网系统，结合图 9—11，可以总结出以下规律：

1) 对于第 i 台 VSG，减小虚拟阻尼、增大虚拟惯量以及减小有功调频系数，都会导致电网频率的阻尼比减小，稳定性降低，受扰后表现出电网频率振荡幅值增大，振荡衰减速度减缓；

2) 对于第 i 台 VSG，减小虚拟阻尼、增大虚拟惯量以及减小有功调频系数，都会导致该台 VSG 的输出频率的阻尼比减小，稳定性降低，受扰后表

现出自身频率振荡幅值增大，振荡衰减速度变慢；

3) 对于第 i 台 VSG，减小虚拟阻尼、增大虚拟惯量以及减小有功调频系数，都会导致该台 VSG 与其他 VSG 间频率差的阻尼比减小，受扰后表现出振荡衰减速度减缓；但振荡幅值是由两者的参数差值决定，参数差值越大，频率差振荡幅值越大；

4) 第 i 台 VSG 的有功控制环参数的变化，对其他与之并联的 VSG 自身的频率稳定性影响较小。

4 仿真验证

为验证前述理论分析的正确性，利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建如图 3 所示的 VSG 三机并联并网仿真模型，初始状态下，各 VSG 系统参数相同，详见表 1 中 VSG1 的参数。

4.1 负载扰动工况下仿真验证

$t=3s$ 时，在 PCC 点处施加 2pu 有功功率扰动，以此验证功率扰动下系统参数对 VSG 多机并联系统频率稳定性的影响规律。

4.1.1 连接阻抗差异对系统频率稳定性的影响

设置 VSG1 的连接阻抗为参考值 Z_{en} 。在突加载工况下，VSG3 的连接阻抗 Z_{e3} 分别为 $0.5Z_{en}$ 、 Z_{en} 和 $2Z_{en}$ 时，可得不同连接阻抗下 VSG3 的频率以及 PCC 点处频率的仿真波形，如图 12 所示。其中 P_3 、 ω_3 分别表示 VSG3 的输出功率和频率， $\delta\omega_{3-1}$ 表示 VSG3 与 VSG1 的频率差， f_{PCC} 表示并网点的频率。

从图 12 可以看出，VSG3 连接阻抗的越大，在突加载扰动下，其自身输出频率和功率的波动幅值越小，PCC 点处的频率波动幅值越小，VSG3 与

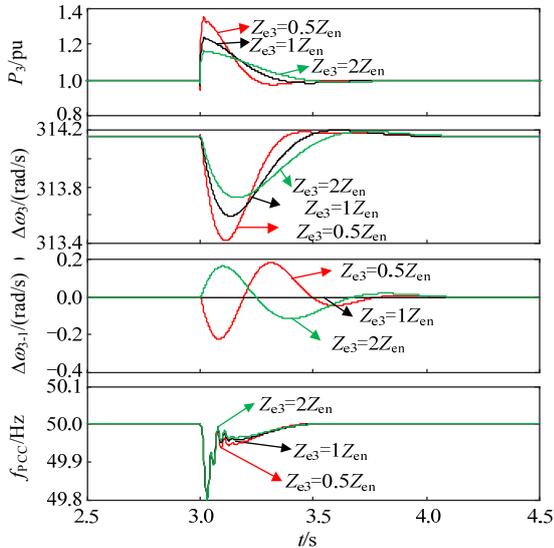


图 12 系统突加载工况下不同 Z_{e3} 时的仿真波形
Fig. 12 Simulation waveforms with different Z_{e3} under load disturbance

VSG1 间的频率差振荡频率越小，且 Z_{e3} 与 Z_{en} 差值越大，频率差波动幅值越大。此外，扰动后各波形达到稳态的时间差异不大，说明阻尼比差异不大，仿真结果验证了前文理论分析的正确性。

4.1.2 输出功率差异对系统频率稳定性的影响

在各并联 VSG 其他参数相同的条件下，VSG3 的输出功率 P_3 分别为 0.5pu、1pu 以及 1.5pu 时，可得到负载扰动下 VSG3 输出不同功率时的系统频率仿真波形，如图 13 所示。

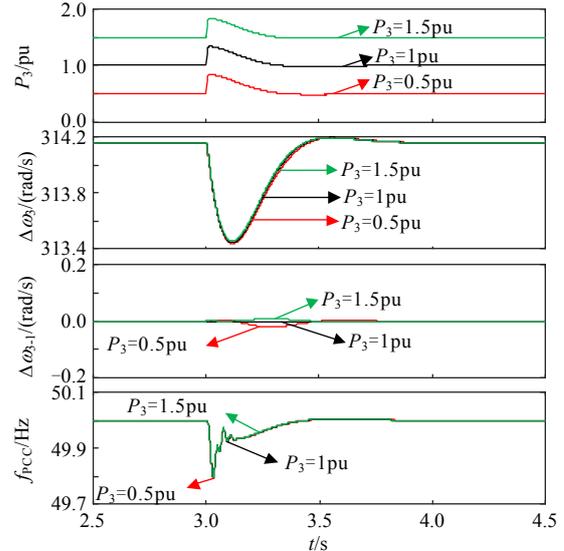


图 13 系统突加载工况下不同 P_3 时时仿真波形
Fig. 13 Simulation waveforms with different P_3 under load disturbance conditions

从图 13 可以看出，在外部负载扰动下，VSG3 的输出功率差异不会导致各 VSG 的输出频率和功率的动态响应有太大的差异。所以在各 VSG 参数相同时，各 VSG 的输出功率大小不是影响系统的频率稳定性的关键因素。仿真结果与前文的理论分析一致。

4.1.3 有功环参数差异对系统频率稳定性的影响

在各并联 VSG 其他参数相同的条件下，同样设置 VSG1 的有功环控制参数为参考值，VSG3 的虚拟转动惯量、虚拟阻尼系数和有功调频系数与各自的参考值的比值都为 0.5、1 和 2 时，可得负载扰动下系统的频率响应仿真波形，分别如图 14、15 和 16 所示。

从图 14—16 可以看出，在突加载扰动下，减小 D_3 、增大 J_3 以及减小 $K_{\omega 3}$ ，都会导致 VSG3 输出频率、VSG3 与参考 VSG 的频率差以及 PCC 点的频率稳定性变差。其中减小 D_3 以及 $K_{\omega 3}$ 都会导致频率的波动幅值变大；而增大 J_3 会提高系统惯性，在功率扰动时会为系统提供更多的功率支撑，从而减小扰动下频率以及功率的振荡幅值，但同时也会

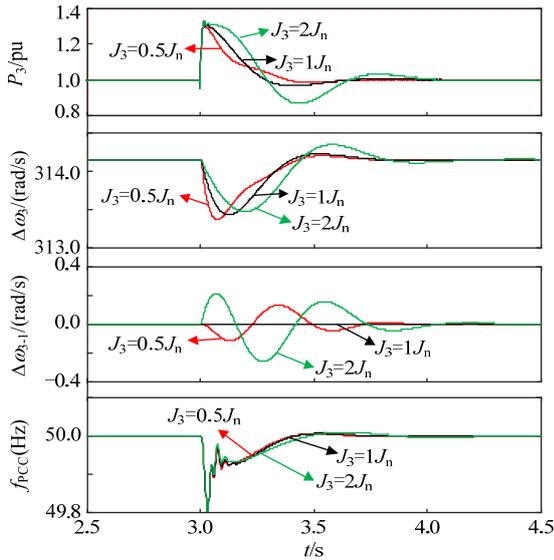


图 14 系统突加载工况下不同 J_3 时时仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms with different J_3 under load

disturbance conditions

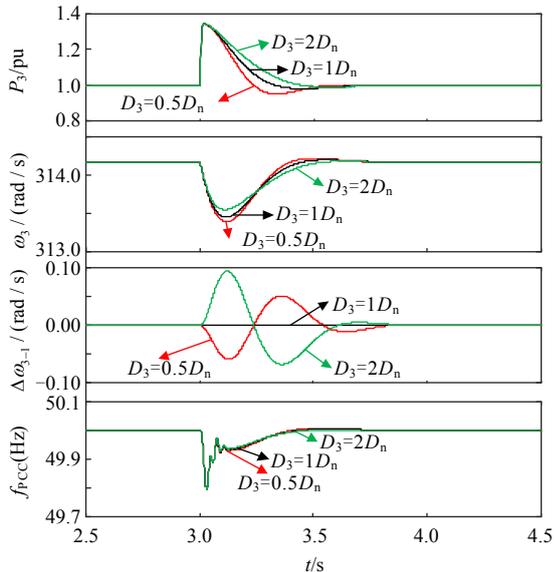


图 15 系统突加载工况下不同 D_3 时的仿真波形

Fig. 15 Simulation waveforms with different D_3 under

load disturbance conditions

增加扰动下频率以及功率的振荡时间。仿真结果与理论分析一致。

4.2 电网频率跌落工况下仿真验证

本节将在电网频率跌落工况下，通过仿真验证系统中各 VSG 在参数不同时的响应规律，进一步验证前文理论分析的正确性。本节基于 VSG 三机并联仿真模型，在 $t=3s$ 时电网频率跌落 0.1Hz。

4.2.1 连接阻抗差异对系统频率稳定性的影响

在电网频率跌落条件下，VSG2 和 VSG3 的连接阻抗分别为 $2Z_{en}$ 和 $4Z_{en}$ 时，可得不同连接阻抗下 VSG 并联系统的仿真波形，如图 17 所示。图中 P_i 为第 i 台 VSG 的输出功率， ω_i 为第 i 台 VSG 的输

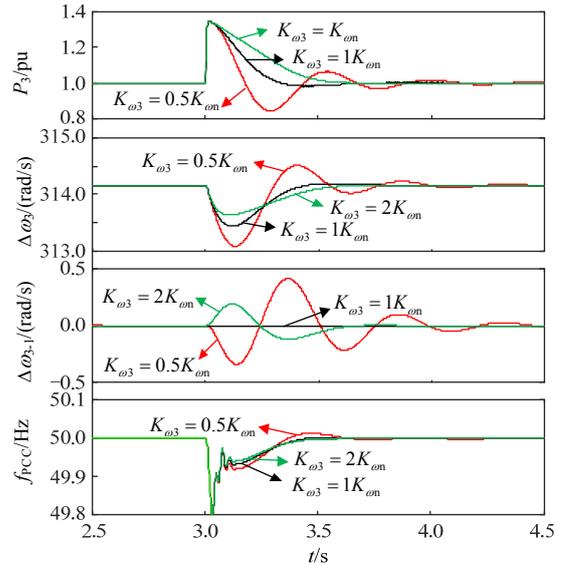


图 16 系统突加载工况下不同 $K_{\omega 3}$ 时的仿真波形

Fig. 16 Simulation waveforms with different $K_{\omega 3}$ under

load disturbance conditions

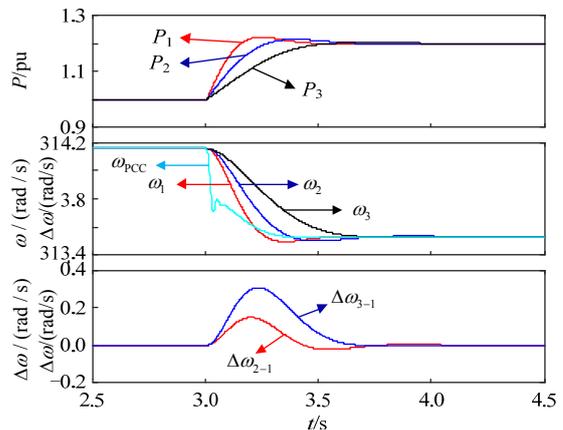


图 17 电网频率跌落工况下不同 Z_c 时的仿真波形

Fig. 17 Simulation waveforms with different Z_c under grid

frequency drop conditions

出频率， $\delta\omega_{i-1}$ 为第 i 台 VSG 与 VSG1 间的频率差。

从图 17 可以看出，在系统出现电网频率跌落时，由于 VSG 一次调频的作用，各 VSG 均额外发出有功功率以支撑电网频率。此外，与 PCC 点连接阻抗较大的 VSG，其自身的输出功率和频率的阻尼较大，在遭受电网频率跌落扰动时响应较慢，振荡幅值较小，但与参考 VSG 的频率差的振荡幅值变大。所以连接阻抗可以为 VSG 提供一定的阻尼，在遭受扰动时使自身频率波动减小，但对于连接阻抗差异较大的两台 VSG，在遭受扰动时两者的频率差振荡幅值较大，严重时可能导致并联 VSG 间出现功角摇摆甚至失稳，不利于 VSG 间的稳定运行。

4.2.2 有功环参数差异对系统频率稳定性的影响

在各并联 VSG 其他参数相同的条件下，VSG1、VSG2 以及 VSG3 的虚拟转动惯量分别为 $1J_n$ 、 $1.5J_n$

以及 $2J_n$ 时,可以得到各 VSG 在不同 J 下的频率仿真波形,如图 18 所示。

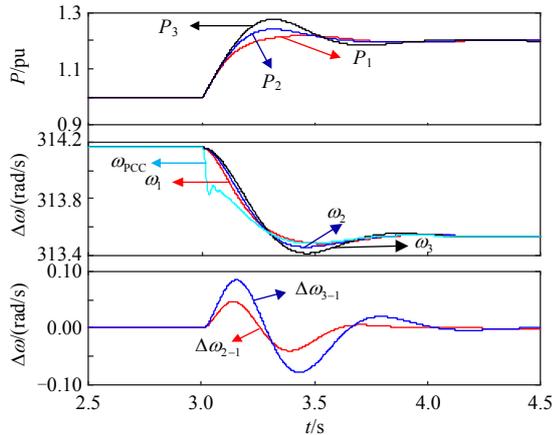


图 18 电网频率跌落工况下不同 J 时的仿真波形

Fig. 18 Simulation waveforms with different J under grid frequency drop conditions

从图 18 可以看出,在系统出现电网频率跌落时,虚拟惯量越大的 VSG 其功率和频率的振荡幅值越大,振荡持续时间越长;虚拟惯量差异越大的 VSG,电网频率扰动下其与参考 VSG 的频率差振荡幅值越大,振荡时间越长。仿真结果进一步验证了理论分析的正确性。

当 VSG 的有功调频系数 K_ω 很小时, VSG 多机并联并网系统将出现频率振荡失稳现象,如图 19 所示。在各并联 VSG 初始参数相同的条件下, $t=2s$ 时, VSG1 参数不变, VSG2 和 VSG3 的 K_ω 分别增大到 $1.5K_{\omega n}$ 和减小到 $0.001K_{\omega n}$, 此时系统未受到扰动不会出现失稳现象。在 $t=3s$ 时,电网受到一个扰动后频率跌落 0.1Hz, 此时 VSG3 的频率和功率均出现明显的振荡失稳现象。因此, VSG 的有功调频系数 K_ω 越小, VSG 自身频率和与参考 VSG 的频率差的稳定性越差,过小的 K_ω 甚至会导致 VSG 的频

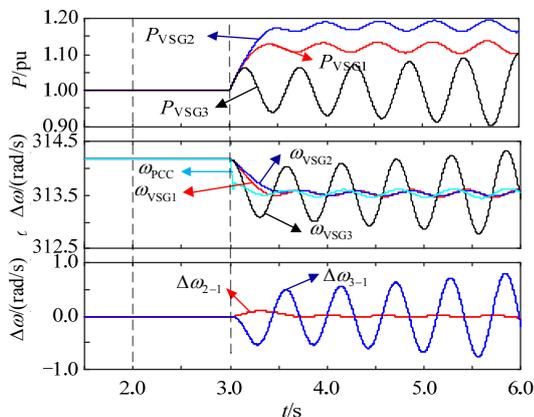


图 19 电网频率跌落工况下不同 K_ω 时的仿真波形

Fig. 19 Simulation waveforms with different K_ω under grid frequency drop conditions

率和功率出现发散振荡现象,严重威胁系统的安全稳定运行。该仿真结果与理论分析保持一致。

5 结论

本文针对 VSG 多机并联并网系统频率稳定性问题,推导了 VSG 多机并联并网系统小信号模型,结合系统特征根轨迹以及特征根对应的状态变量的参与因子运动轨迹,分析了线路连接阻抗、输出功率和有功环控制参数等因素对系统低频段特征根的影响关系,并得出了各种因素对 VSG 本体、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网之间频率的作用规律,所得到的主要结论如下:

1) VSG 的连接阻抗将为 VSG 的频率动态响应特性提供阻尼。增大连接阻抗,将提高 VSG 自身频率、VSG 与 VSG 之间的频率差以及电网频率的稳定性,系统受扰后将表现出 VSG 自身频率以及电网频率振荡幅值减小。

2) 当各 VSG 参数以及连接阻抗相同时,各 VSG 的输出功率大小不会明显影响 VSG 本体、VSG 与 VSG 之间以及 VSG 与电网间的频率稳定性。

3) 对于多机并联并网系统中的每台 VSG,若所有参数和连接阻抗相同,扰动下各并联 VSG 间将没有相互作用。而同时减小虚拟阻尼系数、增大虚拟惯量系数以及减小有功调频系数时,都会降低各 VSG 自身的频率稳定性以及电网频率稳定性。

对于 VSG 多机并联并网系统,若各 VSG 的有功环控制参数存在差异,则扰动下各并联 VSG 之间将存在相互作用。某台 VSG 的虚拟阻尼减小、虚拟惯量增大以及有功调频系数减小,都会降低自身频率以及电网频率的稳定性,同时还会将其与其他 VSG 间的相互作用加剧,受扰后将表现出两者之间的频率差振荡衰减速度变慢,稳定性降低。

参考文献

[1] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60.
Chen Ruchang, Chen Fei, Zhang Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60(in Chinese).
[2] He Xing, Ai Qian, Qiu R C, et al. A big data architecture design for smart grids based on random matrix theory [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 674-686.
[3] 丁少倩, 林涛, 翟学, 等. 基于短路容量的含大规模新

- 能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 40-47.
- Ding Shaoqian, Lin Tao, Zhai Xue, et al. Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale new energy sources based on short-circuit capability [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 40-47(in Chinese).
- [4] 林伯强. 中国新能源发展战略思考[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2018, 18(2): 76-83.
- Lin Boqiang. Thoughts on China's new energy development strategy[J]. Strategic Consideration of New Energy Development in China, 2018, 18(2): 76-83(in Chinese).
- [5] 黄碧斌, 李琼慧. 储能支撑大规模分布式光伏接入的价值评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 88-93.
- Huang Bibin, Li Qionghui. Value assessment for energy storage in supporting large-scale integration of distributed PVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 88-93(in Chinese).
- [6] Zhong Qingchang, Weiss G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 唐酿, 盛超, 陈萌, 等. 虚拟同步发电机技术综述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(11): 30-38.
- Tang Niang, Sheng Chao, Chen Meng, et al. Review on virtual synchronous generator technologies[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 30-38(in Chinese).
- [8] Fathi A, Shafiee Q, Bevrani H. Robust frequency control of microgrids using an extended virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6289-6297.
- [9] Khan S, Bletterie B, Anta A, et al. On small signal frequency stability under virtual inertia and the role of PLLs[J]. Energies, 2018, 11(9): 1-18.
- [10] Zou Peigen, Meng Jianhui, Wang Yi. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Beijing, China: IEEE, 2017: 1-6.
- [11] 刘倪, 张昌华, 段雪, 等. 并网逆变器小信号建模方法对比及其适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 134-141.
- Liu Ni, Zhang Changhua, Duan Xue, et al. Comparison and applicability analysis of small-signal modeling methods for grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 134-141(in Chinese).
- [12] 王金华, 王宇翔, 顾云杰, 等. 基于虚拟同步发电机控制的并网变流器同步频率谐振机理研究[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 17-23.
- Wang Jinhua, Wang Yuxiang, Gu Yunjie, et al. Synchronous frequency resonance in grid-connected VSCs with virtual synchronous generator technology [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 17-23(in Chinese).
- [13] 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[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 381-390.
- Li Wuhua, Wang Jinhua, Yang Heya, et al. Power dynamic coupling mechanism and resonance suppression of synchronous frequency for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 381-390(in Chinese).
- [14] Shintai T, Miura Y, Ise T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [15] 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): 412-422.
- 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): 412-422(in Chinese).
- [16] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 72-77.
- Li Dongdong, Zhu Qiangwei, Chen Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77(in Chinese).
- [17] 陶亮, 程军照, 王文玺, 等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 128-135.
- Tao Liang, Cheng Junzhao, Wang Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 128-135(in Chinese).
- [18] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
- Zhang Bo, Yan Xiangwu, Huang Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52(in Chinese).
- [19] 任碧莹, 邱姣姣, 刘欢, 等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 128-138.
- Ren Biying, Qiu Jiaojiao, Liu Huan, et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators

[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 128-138(in Chinese).

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31464—2015 电网运行准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 31464—2015 The grid operation code[S]. Beijing: China Standards Press, 2015(in Chinese).

[21] 昆德(加). 电力系统稳定与控制[M]. 《电力系统稳定与控制》翻译组, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.

Kundur P. Power system stability and control [M]. Translation Group of Power System Stability and Control, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2002(in Chinese).

附录 A

1) 坐标变换矩阵参数.

$$T_{si} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -\sin \delta_i \\ \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix}, T_{ci} = \begin{bmatrix} -I_{odi} \sin \delta_i - I_{oqi} \cos \delta_i \\ I_{odi} \cos \delta_i - I_{oqi} \sin \delta_i \end{bmatrix}$$

$$T_{si}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \sin \delta_i \\ -\sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix}, T_{ui}^{-1} = \begin{bmatrix} -U_{bdi} \sin \delta_i + U_{bqi} \cos \delta_i \\ -U_{bdi} \cos \delta_i - U_{bqi} \sin \delta_i \end{bmatrix}$$

2) 功率环矩阵参数.

$$A_p = \begin{bmatrix} -D\omega_0 - K_f \\ J\omega_0 \end{bmatrix},$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1.5I_{od}}{J\omega_0} & \frac{-1.5I_{oq}}{J\omega_0} & \frac{-1.5U_{od}}{J\omega_0} & \frac{-1.5U_{oq}}{J\omega_0} \end{bmatrix},$$

$$C_{p\omega} = [1 \ 0 \ 0], C_{pe} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{p\omega} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$D_{pe} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.5K_q I_{oq} & -1.5K_q I_{od} & -1.5K_q U_{oq} & 1.5K_q U_{od} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3) 滤波器与连接线路矩阵参数.

$$A_f = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega_0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_0 & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_e} & 0 & \frac{-R_e}{L_e} & \omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_e} & -\omega_0 & \frac{-R_e}{L_e} \end{bmatrix}, B_{f1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{f2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_e \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_e & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$B_{f3} = [I_{iq} \ -I_{id} \ U_{oq} \ -U_{od} \ I_{oq} \ -I_{od}]^T$$

4) VSG 单机小信号模型矩阵参数.

$$A_{VSGi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0_{1 \times 6} \\ 0 & A_p & B_p \\ BF_2 T_{wi}^{-1} & B_{F3} & H \end{bmatrix},$$

$$H = A_f + B_{F1} D_{pe}, B_{VSGi} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ B_{F2} T_{si}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B_{\omega} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0_{7 \times 1} \end{bmatrix}, C_{VSGi} = [T_{ci} \ 0_{2 \times 5} \ T_{si}]$$

5) VSG 多机并联小信号模型矩阵参数.

$$\Delta x_{VSG_P} = [\Delta x_{VSG1} \ \Delta x_{VSG2} \ \dots \ \Delta x_{VSGi}]$$

$$\Delta i_{oDQ_P} = [\Delta i_{oDQ1} \ \Delta i_{oDQ2} \ \dots \ \Delta i_{oDQi}]$$

$$A_{VSG_P} = \begin{bmatrix} A_{VSG1} + B_{g\omega 1} & 0 & \dots & 0 \\ B_{g\omega 1} & A_{VSG2} & \dots & 0 \\ \dots & 0 & \dots & 0 \\ B_{g\omega 1} & 0 & \dots & A_{VSGi} \end{bmatrix}, B_{VSG_P} = \begin{bmatrix} B_{VSG1} \\ B_{VSG2} \\ \dots \\ B_{VSGi} \end{bmatrix}$$

$$B_{g\omega 1} = B_{\omega} C_{g\omega 1}, C_{g\omega 1} = [0 \ 1 \ 0_{1 \times 6}]$$

6) 输电线路和虚拟对地电阻小信号模型矩阵参数.

$$A_g = \begin{bmatrix} -\frac{R_g}{L_g} & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_g}{L_g} \end{bmatrix}, B_{g1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_g} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_g} \end{bmatrix}, B_{g2} = \begin{bmatrix} I_{gQ} \\ -I_{gD} \end{bmatrix}$$

$$B_{g3} = \begin{bmatrix} \frac{E_g \sin \delta_{g0}}{L_g} \\ -\frac{E_g \cos \delta_{g0}}{L_g} \end{bmatrix}, B_{g\omega} = [-1]$$

$$B_{VNO} = \begin{bmatrix} R_{VN} & 0 & \dots & R_{VN} & 0 \\ 0 & R_{VN} & \dots & 0 & R_{VN} \end{bmatrix}_{2 \times 2i},$$

$$B_{VNG} = \begin{bmatrix} -R_{VN} & 0 \\ 0 & -R_{VN} \end{bmatrix}$$

7) VSG 多机并联并网系统小信号模型矩阵参数.

$$A_{sys} = \begin{bmatrix} M & B_{VSG_P} B_{VNG} & 0 \\ N & A_g + B_{g1} B_{VNG} & B_{g3} \\ B_{g\omega} C_{\omega 1} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M = A_{VSG_P} + B_{VSG_P} B_{VNO} C_{VSG_P}$$

$$N = B_{g1} B_{VNO} C_{VSG_P} + B_{g2} C_{\omega 1}, C_{\omega 1} = [0 \ 1 \ 0_{1 \times 6} \ 0_{1 \times 8(i-1)}]$$



曾德银

在线出版日期: 2020-03-18.

收稿日期: 2019-08-02.

作者简介:

曾德银(1994), 男, 硕士研究生, 主要从事风力发电并网控制技术研究, zdy_ncnc@163.com;

*通信作者: 姚骏(1979), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制、电力电子与电力传动、风电技术以及新能源电能变换技术, topyj@163.com.

(责任编辑 邱丽萍)