

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.005

考虑功率耦合的构网型多VSG系统频率振荡特性分析

李威¹, 马美玲^{1,2}, 孙伟卿¹

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093;

2. 上海交通大学输变电控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的构网型变流器能为新能源并网提供一定的惯量和阻尼支撑。然而, VSG控制环节产生的功率耦合问题会引起系统频率振荡, 严重时威胁系统安全。针对多台VSG并网时的功率耦合交互对频率振荡的影响机理不清晰的问题, 文中提出一种考虑功率耦合的多VSG并网系统阻抗建模方法, 并结合参数变化分析频率的振荡特性。首先, 分析单VSG并网的功率耦合机理, 并基于此建立多VSG并网系统的阻抗模型, 揭示多VSG下输出角频率主要受自身功率、交互功率和电网角频率影响。其次, 提出一种基于动态相对增益矩阵的方法, 定量分析系统参数变化对VSG间交互影响的大小, 得到高、低频段下多VSG系统参数变化对系统耦合交互的影响趋势。最后, 在PSCAD中构建3台VSG并网系统模型, 并通过时域仿真验证理论分析的准确性。

关键词: 虚拟同步发电机(VSG); 构网型变流器; 功率耦合; 阻抗模型; 频率振荡; 动态相对增益矩阵

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)02-0044-11

0 引言

“双碳”背景下, 随着风光等新能源装机容量不断增加, 电网惯性不足、电压频率支撑能力弱的问题日益突显, 不利于电力系统的稳定运行^[1-3]。因此, 提出构网型虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的概念。VSG模拟同步发电机的转子运行特性, 为新能源并网提供新的惯量与阻尼支撑^[4-5]。然而, 受到VSG控制器设计、小线路阻抗比、电网功角波动等因素的影响, VSG控制将产生功率耦合问题。功率耦合问题不仅使有功功率、无功功率相互影响, 还会造成变流器送电能力受限, 系统振荡^[6-8]。另外, 由于电网阻抗的存在, 在多VSG并网情况下, 功率耦合会通过VSG交互通道传递给其他并网线路, 导致振荡进一步扩散, 严重时会引起系统失稳^[9-10]。

当前VSG并网振荡问题分析大致分为2类: (1) 不考虑功率耦合的VSG并网系统振荡。文献[11-12]构建多VSG并网系统的状态空间小信号模型, 采用参与因子、特征值分析法分析系统参数对系统振荡特性的影响。文献[13]考虑系统延时, 建立多VSG并联系统的全阶模型, 利用特征值轨迹分析各参数对系统高、低频稳定性的影响规律, 但随着并网VSG数量的增加, 其建模和计算复杂度

增大, 分析难度增大。文献[14]引入虚拟复阻抗重塑系统阻抗特性, 以达到抑制功率振荡的目的, 但引入虚拟阻抗的同时会限制变流器功率传输能力。文献[15]在传统的VSG有功-频率控制的前向通道增加了有功前馈补偿环节, 解除了一次调频系数和虚拟阻尼之间的相互耦合, 消除了有功的稳态偏差和动态振荡问题。文献[16-19]运用机电比拟原理建立VSG并网的功频振荡导纳模型, 推导出多变流器间并网系统的谐振特性及系统参数变化所产生交互影响的规律。上述文献都忽略了VSG的固有功率耦合问题, 当VSG工作在弱电网、低阻抗时, 功率之间可能会存在较为严重的耦合^[20-22], 威胁电力系统的安全稳定, 因此需要考虑VSG中存在的功率耦合问题。

(2) 考虑功率耦合的VSG并网系统振荡。文献[23]建立多VSG并网系统的 $P/Q-\omega/V$ “导纳”模型, 分析不同VSG间系统功率、频率和电压的振荡特性, 在此基础上给出关键参数对功率耦合和振荡特性的影响, 但其只考虑了功率耦合的相互影响, 未给出多VSG并网系统在功率耦合下对角频率的振荡机理。文献[24]引入相对增益矩阵(relative gain array, RGA)定量分析系统关键控制参数对功率耦合特性的影响。文献[25]建立功率耦合的多VSG导纳模型, 但其忽略了无功功率的变化对功率耦合的影响, 不能精确表示多VSG间的功率耦合特性。文献[26-27]提出功率解耦策略来消除功率环路之间的耦合, 以提高系统的动态响应性

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2025-02-25

基金项目: 上海市科技创新行动计划资助项目“新能源并网系统的同步机理与暂态稳定域边界研究”(22YF1429500)

能, 但仅针对单 VSG 并网系统进行分析, 未研究多 VSG 并网的功率耦合机理。因此有必要对多 VSG 功率耦合交互下的角频率振荡特性进行建模分析。

基于此, 文中以单台 VSG 并网为研究对象, 在对功率耦合小信号建模的基础上, 推导出角频率关于有功和无功的 ω - P/Q 表达式。其次, 利用阻抗模型建立多 VSG 并网系统的阻抗模型, 推导出含功率耦合交互的多 VSG 输出角频率的传递函数矩阵。采用动态相对增益矩阵(dynamic relative gain array, DRGA)定量分析系统参数变化时多 VSG 不同控制通道间的功率耦合影响程度, 并利用传递函数分析功率耦合交互下多 VSG 系统的角频率振荡特性及其变化规律。最后, 通过时域仿真验证上述模型及系统参数影响分析的准确性。

1 VSG 功率耦合机制分析

1.1 VSG 工作原理

VSG 并网系统拓扑如图 1 所示。分布式电源(distributed generation, DG)利用变流器经 RLC 滤波电路和线路阻抗接入公共连接点(point of common coupling, PCC)实现并网。图 1 中, R_n 、 L_n 、 C_n 分别为第 n 台 VSG 并网线路滤波电阻、滤波电感、滤波电容; V_n 为第 n 台 VSG 输出电压值; U_g 为理想三相电压源; L_g 、 R_g 分别为电网电感、电阻。

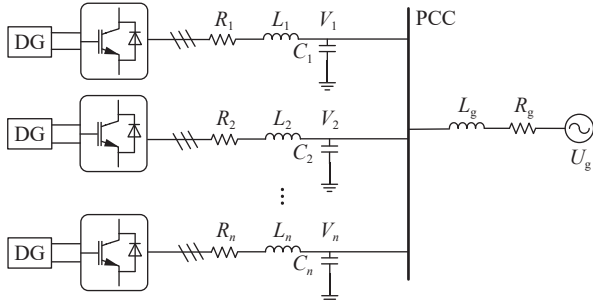


图 1 VSG 并网系统拓扑

Fig.1 Topology of VSG grid-connected system

文中 VSG 并网拓扑控制主要由有功环与无功环两大控制部分组成, 如图 2 所示。其中有功-频率控制环模拟同步发电机的惯量与一次调频环节; 无功-电压控制环模拟同步发电机的励磁调压环节; 电压电流双闭环控制实现控制的快速动态响应, 避免延迟问题带来的系统扰动。图 2 中, P_m 、 Q_m 分别为有功、无功功率参考指令值; ω_n 、 ω 分别为额定角频率、VSG 输出角频率; δ 为 VSG 输出功角; V_m 、 V_e 、 V_g 分别为 VSG 额定电压、VSG 输出电压和电网电压幅值; R_f 、 L_f 、 C_f 分别为滤波电阻、滤波电感和滤波电容; V_a 、 V_b 、 V_c 为系统单相电压值; V_{abc} 、 I_{abc} 分别

为系统三相电压与三相电流值; P_e 、 Q_e 分别为 VSG 实际输出有功、无功功率; J 、 D_p 、 K 、 D_q 分别为虚拟惯量、有功阻尼系数、虚拟励磁调节系数和无功下垂系数; PWM 为脉冲宽度调制。

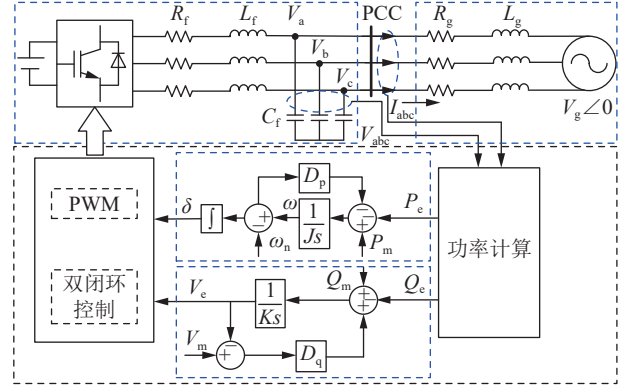


图 2 VSG 并网拓扑控制

Fig.2 Topology control of VSG grid connection

1.2 单 VSG 功率耦合交互的小信号建模

图 2 中, VSG 的有功环与无功环通过模拟同步发电机转子运动方程和励磁电压来实现惯量支撑和电压控制, 具体表达式为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n} - D_p(\omega - \omega_n) \\ \delta = \int (\omega - \omega_n) dt \\ K \frac{dV_e}{dt} = Q_m - Q_e - D_q(V_e - V_m) \end{cases} \quad (1)$$

结合小信号模型理论, 对式(1)进行 Laplace 变换, 可得:

$$\begin{cases} G_{P\omega}(s) = \frac{\omega - \omega_n}{P_m - P_e} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{J\omega_n s + D_p\omega_n} \\ G_{QV}(s) = \frac{V_e - V_m}{Q_m - Q_e} = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{1}{Ks + D_q} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $G_{P\omega}(s)$ 、 $G_{QV}(s)$ 分别为有功环与无功环控制的传递函数。

基于小信号模型理论, 联立式(1)和式(2)可得 VSG 的控制小信号表达式为:

$$\Delta N = M(\Delta S_m - \Delta S_e) \quad (3)$$

式中: $\Delta N = [\Delta\omega \ \Delta V]^T$; $\Delta S_m = [\Delta P_m \ \Delta Q_m]^T$; $\Delta S_e = [\Delta P_e \ \Delta Q_e]^T$; $M = \text{diag}(1/(J\omega_n s + D_p\omega_n), 1/(Ks + D_q))$ 。

采用文献[23]中建模方法, 根据图 2 中系统潮流可知, 三相电压电流在 dq 坐标系下, 其 dq 解耦控制的主电路动力学方程可表示为:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} = V_{ed} - V_{pccd} - i_d R_f + \omega_n L_f i_q \\ L_f \frac{di_q}{dt} = V_{eq} - V_{pccq} - i_q R_f - \omega_n L_f i_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 VSG 输出电流的 d 、 q 轴分量; V_{ed} 、 V_{eq} 分别为 VSG 输出电压的 d 、 q 轴分量; V_{pccd} 、 V_{pccq} 分别为并网点电压的 d 、 q 轴分量。对式(4)进行 Laplace 变换, 得出:

$$\begin{cases} i_d = \frac{(R_f + L_f s)(V_e \cos(\delta) - V_{pcc}) + X_f V_e \sin(\delta)}{(R_f + L_f s)^2 + X_f^2} \\ i_q = \frac{-X_f (V_e \cos(\delta) - V_{pcc}) + (R_f + L_f s)V_e \sin(\delta)}{(R_f + L_f s)^2 + X_f^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $X_f = \omega_n L_f$; V_{pcc} 为并网点电压。

根据瞬时功率理论, VSG 输出有功功率和无功功率在 dq 坐标系下可表示为:

$$\begin{cases} P_e = 1.5(V_{ed}i_d + V_{eq}i_q) \\ Q_e = 1.5(-V_{ed}i_q + V_{eq}i_d) \end{cases} \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)可得到 VSG 输出有功功率、无功功率与功角和电压幅值的等式。

$$\begin{cases} P_e = \frac{1.5[(R_f + L_f s)(V_e^2 - V_e V_{pcc} \cos(\delta)) + X_f V_e V_{pcc} \sin(\delta)]}{(R_f + L_f s)^2 + X_f^2} \\ Q_e = \frac{1.5[X_f V_e (V_e - V_{pcc} \cos(\delta)) - (R_f + L_f s)V_e V_{pcc} \sin(\delta)]}{(R_f + L_f s)^2 + X_f^2} \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)的有功、无功功率进行线性化处理, 建立功率关于角频率、电压的小信号模型:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_e(s) \\ \Delta Q_e(s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}} \begin{bmatrix} \Delta \omega(s) \\ \Delta V(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} G_{11} = Z_1 \times \frac{X_f V_{e0} V_{pcc0} \cos(\delta_0) + (R_f + L_f s)V_{e0} V_{pcc0} \sin(\delta_0)}{s} \\ G_{12} = Z_1 [(R_f + L_f s)(2V_{e0} - V_{pcc0} \cos(\delta_0)) + X_f V_{pcc0} \sin(\delta_0)] \\ G_{21} = Z_1 \times \frac{X_f V_{e0} V_{pcc0} \sin(\delta_0) - (R_f + L_f s)V_{e0} V_{pcc0} \cos(\delta_0)}{s} \\ G_{22} = Z_1 [2X_f V_{e0} - X_f V_{pcc0} \cos(\delta_0) - (R_f + L_f s)V_{pcc0} \sin(\delta_0)] \end{cases} \quad (9)$$

式中: \mathbf{G} 为输出功率与 VSG 输出角频率、电压幅值之间的传递函数矩阵; $Z_1 = 1.5 / [(R_f + L_f s)^2 + X_f^2]$; 下标“0”表示相应变量的稳态值。式(8)说明 VSG 输出的有功功率和无功功率都是关于角频率和电压幅值的函数, 有功功率和无功功率是相互耦合的。因此, 有功功率和无功功率的控制会相

互作用, 从而影响 VSG 控制策略的动态性能和稳定性^[24]。

图3为 VSG 并网时的等效电路, 图中 P_g 、 Q_g 分别为并网有功、无功功率。

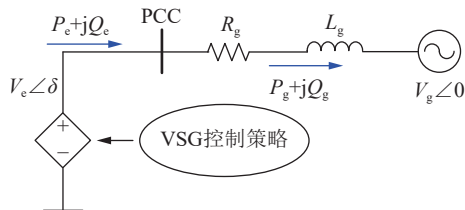


图3 并网变流器等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of grid-connected converter

联立式(3)和式(8)得到 VSG 输出功率 P_e 、 Q_e 与指令功率 P_m 、 Q_m 的关联等式。

$$\Delta \mathbf{S}_e = \frac{\mathbf{GM}}{\mathbf{I} + \mathbf{GM}} \Delta \mathbf{S}_m = \mathbf{H}(s) \Delta \mathbf{S}_m \quad (10)$$

式中: \mathbf{I} 为单位向量; $\mathbf{H}(s)$ 为关于功率交互耦合的传递函数矩阵。

根据式(10), 建立以指令功率为输入, VSG 输出功率为输出的功率耦合交互的小信号模型, 如图4所示。

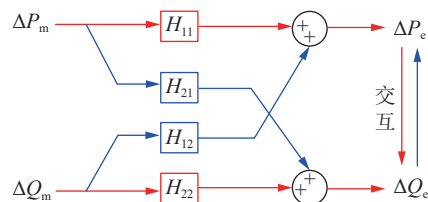


图4 功率耦合小信号模型

Fig.4 Small-signal model for power coupling

联立式(3)、式(8)和式(10)可推导出角频率受有功与无功指令功率影响的表达式为:

$$\Delta \omega = P(s) \Delta P_m + Q(s) \Delta Q_m = \underbrace{\begin{bmatrix} P(s) & Q(s) \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}(s)} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P(s) = \frac{H_{11}(Ks + D_q) + H_{21}G_{12}}{G_{11}(Ks + D_q)} \\ Q(s) = \frac{H_{12}(Ks + D_q) - G_{12}(1 - H_{22})}{G_{11}(Ks + D_q)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta \omega = \hat{\omega} - \hat{\omega}_p$, $\hat{\omega}$ 、 $\hat{\omega}_p$ 分别为 VSG 输出角频率与并网点角频率的小信号扰动; $P(s)$ 、 $Q(s)$ 分别为有功扰动与无功扰动对角频率变化的传递函数。

式(11)建立了单台 VSG 的 ω - P/Q 模型, 基于此, 可建立多 VSG 并网系统的功率耦合模型, 分析多机功率耦合交互对角频率的影响。

图5为 D_q 增大时 $Q(s)$ 开环控制的低频特征值主导极点轨迹图。可以看出, 图中存在非常靠近

虚轴的主导极点, 该极点将造成系统的动态响应速度变慢、稳定性变差, 从而影响频率的动态性能。随着 D_q 增大, 极点远离虚轴, 提高了系统的稳定裕度。

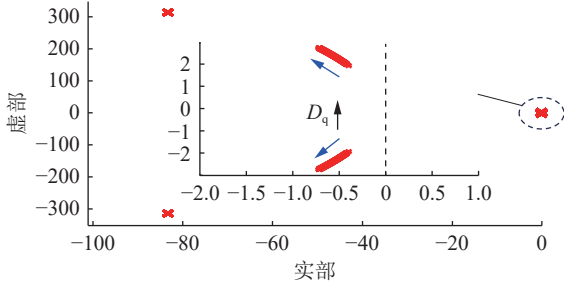
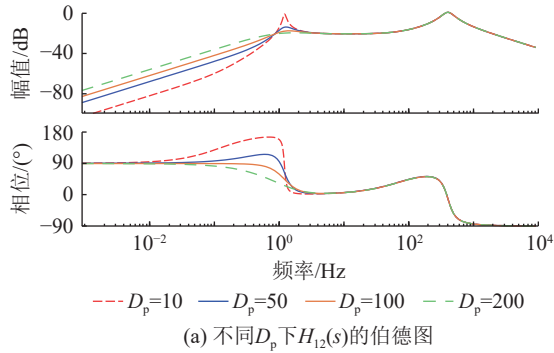


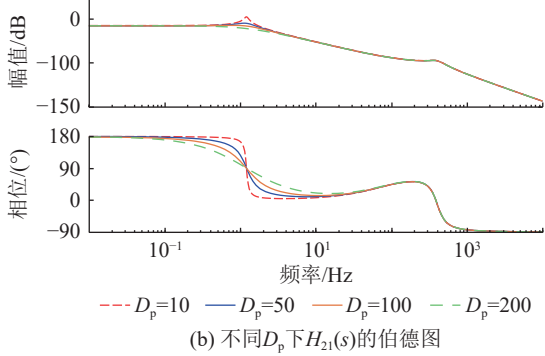
图 5 D_q 增大时 $Q(s)$ 主导极点轨迹图 ($D_q \in [100, 400]$)
Fig.5 Dominant pole locus diagram of $Q(s)$ when D_q increases ($D_q \in [100, 400]$)

1.3 VSG 功率耦合分析

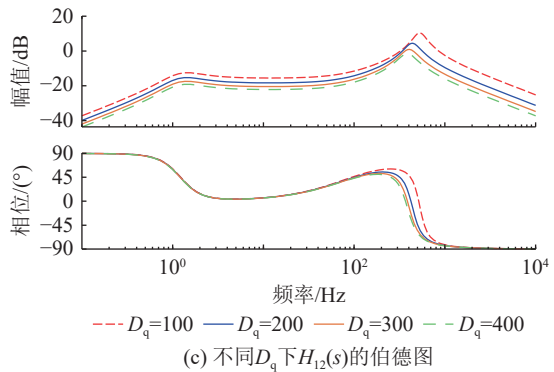
可通过传递函数 $\Delta P_c / \Delta Q_m$ 和 $\Delta Q_c / \Delta P_m$ 描述功率耦合特性, 即 $H_{12}(s)$ 和 $H_{21}(s)$ 。图 6 为不同 D_p 和 D_q 下 $H_{12}(s)$ 和 $H_{21}(s)$ 的伯德图, 初始参数设定见表 1, 当某一参数改变时, 其他参数不变。



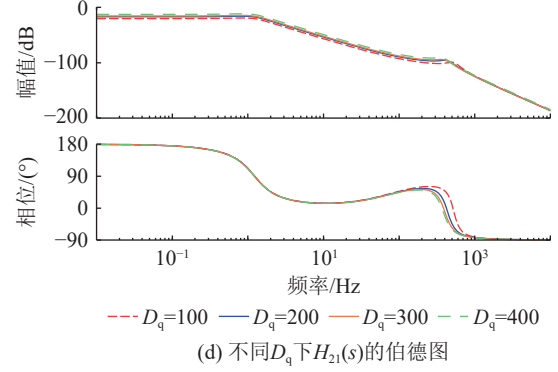
(a) 不同 D_p 下 $H_{12}(s)$ 的伯德图



(b) 不同 D_p 下 $H_{21}(s)$ 的伯德图



(c) 不同 D_q 下 $H_{12}(s)$ 的伯德图



(d) 不同 D_q 下 $H_{21}(s)$ 的伯德图

图 6 不同参数下 $H_{12}(s)$ 和 $H_{21}(s)$ 的伯德图
Fig.6 Bode plots of $H_{12}(s)$ and $H_{21}(s)$ for different parameters

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
P_m /kW	30	R_r /Ω	0.5
Q_m /kvar	4.5	R_g /Ω	0.5
ω_n /(rad·s ⁻¹)	314	J /(kg·m ²)	50
L_r /mH	7.5	D_p	50
L_g /mH	4	D_q	50
C_f /μF	300	K	100

从图 6(a)可以看出, 随着 D_p 的减小, 低频段的谐振幅值增大, 逐渐接近 0 dB, 这表明系统有较小的阻尼将会影响系统的稳定性, 中频段下 D_p 对谐振幅值的影响不大。图 6(b)中, 传递函数 $H_{21}(s)$ 在低频点时与 $H_{12}(s)$ 变化情况一致, 在中频谐振点时, 谐振幅值远小于 0 dB, 系统有足够的稳定裕度, 这表明随着 D_p 的减小, 在低频段, 系统稳定性会增加。从图 6(c)可以看出, 随着 D_q 的增加, 传递函数 $H_{12}(s)$ 在低频和中频段均表现为谐振幅值增大, 系统耦合振荡加剧, 且低频段谐振幅值有足够的稳定裕度。图 6(d)中, 传递函数 $H_{21}(s)$ 在 2 个波段均表现出 D_q 增加, 谐振幅值呈减小趋势, 表明 D_q 的增加有利于减弱系统耦合振荡。

1.4 考虑功率耦合的 ω -P/Q 多 VSG 阻抗建模

多 VSG 并网系统中, 不同的 VSG 间会存在交互作用影响, 造成输出角频率波动, 严重时会影响系统稳定性。因此下文针对多 VSG 并网系统建立 ω -P/Q 阻抗模型, 分析功率耦合下 ω -P/Q 机理。将式 (11) 的功频等式改写为:

$$\hat{\omega}_i - \hat{\omega}_p = \mathbf{D}_i(s) \hat{\mathbf{S}}_{mi} \quad (13)$$

式中: $\hat{\omega}_i$ 为第 i 个 VSG 输出角频率的小信号扰动; $\mathbf{D}_i(s) = [P_i(s) \ Q_i(s)]$, $P_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ 分别为第 i 个 VSG 的有功扰动与无功扰动对角频率变化的传递函数; $\hat{\mathbf{S}}_{mi} = [\Delta P_{mi} \ \Delta Q_{mi}]^T$, ΔP_{mi} 、 ΔQ_{mi} 分别为第

i 个 VSG 有功、无功指令的小信号扰动。

类比文献[20]和文献[28]的导纳建模方法,将式(13)的功频环等效为一个二端口网络。“电压源”为 $\hat{\omega}_i$;输出“阻抗”为 $D_i(s)$;输出“电流”为 \hat{S}_{mi} ;端口输出“电压”为 $\hat{\omega}_p$ 。图7为式(13)的等效阻抗模型。

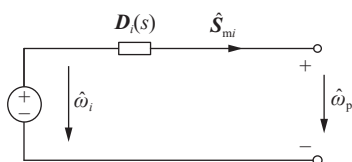


图7 单 VSG 并网等效阻抗模型

Fig.7 Single VSG grid-connected equivalent impedance model

根据电路等效原理,图7的物理意义可以描述为:在功率 \hat{S}_{mi} 变化与并网点角频率 $\hat{\omega}_p$ 扰动下,会影响输出角频率 $\hat{\omega}_i$,此时 $\hat{\omega}_i$ 可理解为“受控电压源”。推广至 n 台 VSG 并网阻抗模型,如图8所示。图中, $\hat{\omega}_g$ 为电网角频率小信号扰动; $1/Y_g$ 为电网阻抗,注意此处电网阻抗并非 X_g 值。

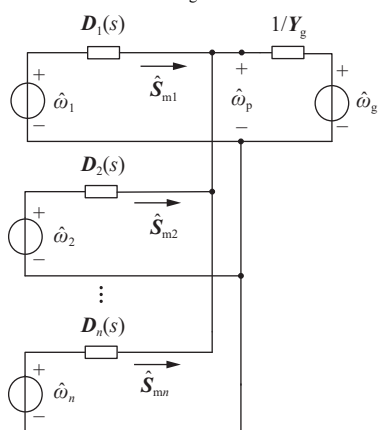


图8 多 VSG 并网系统阻抗模型

Fig.8 Impedance model of multi-VSG grid-connected system

图9为图8的并网等效电路,其中 $Y_{di}(s) = 1/D_i(s)$ 。结合图3,并网点与电网的潮流 $P_g + jQ_g$ 类似于 VSG 输出潮流 $P_e + jQ_e$ 的推导表达式,类比式(11)可推导出式(14)。

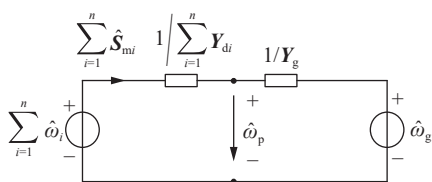


图9 多 VSG 并网等效阻抗电路

Fig.9 Multi-VSG grid-connected equivalent circuit

$$\hat{\omega}_p - \hat{\omega}_g = \underbrace{\begin{bmatrix} N_g(s) & T_g(s) \end{bmatrix}}_{D_g(s)} \begin{bmatrix} \hat{P}_g \\ \hat{Q}_g \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{cases} N_g(s) = \frac{2s [X_g (V_g \cos(\delta_1) - 2V_{pcc}) + (L_g s + R_g) V_g \sin(\delta_1)]}{3(V_{pcc} V_g^2 - 2V_{pcc}^2 V_g \cos(\delta_1))} \\ T_g(s) = \frac{2s [X_g V_g \sin(\delta_1) + (2V_{pcc} - V_g \cos(\delta_1))(L_g s + R_g)]}{3(V_{pcc} V_g^2 - 2V_{pcc}^2 V_g \cos(\delta_1))} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\delta_1 = \int (\omega_p - \omega_g) dt$; $D_g = 1/Y_g$ 。

结合图9,可根据 Kirchhoff 定律列出等式关系:

$$\left(\sum_{i=1}^n \hat{\omega}_i - \hat{\omega}_p \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_{di} \right) = (\hat{\omega}_p - \hat{\omega}_g) Y_g \quad (16)$$

将式(13)代入式(16),整理后可得第 j 台 VSG 的输出角频率 $\hat{\omega}_j$ 的具体表达式为:

$$\hat{\omega}_j(s) = P_j(s) \hat{S}_{mj} + \sum_{i=1, i \neq j}^n B_{ji}(s) \hat{S}_{mi} + Q_j(s) \hat{\omega}_g(s) \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_j(s) = D_j(s) \left\{ \left[Y_g - (n-2) \sum_{i=1}^n Y_{di} \right] / \left[Y_g - (n-1) \sum_{i=1}^n Y_{di} \right] \right\} \\ B_{ji}(s) = D_i(s) / \left[Y_g / \sum_{i=1}^n Y_{di} - (n-1) \right] \\ Q_j(s) = Y_g / \left[Y_g - (n-1) \sum_{i=1}^n Y_{di} \right] \end{cases} \quad (18)$$

式(17)表明第 j 台 VSG 输出角频率主要受三部分影响。(1)自身有功和无功功率扰动的影响,主要体现在传递函数 $P_j(s)$ 上。(2)其他 VSG 有功和无功功率扰动的影响,主要体现在传递函数 $B_{ji}(s)$ 上。(3)电网角频率扰动的影响,主要体现在传递函数 $Q_j(s)$ 上。文中着重分析不同 VSG 通道间功率耦合交互对输出角频率的影响。

图10为不同数量 VSG 并网时, $B_{ji}(s)$ 的伯德图。

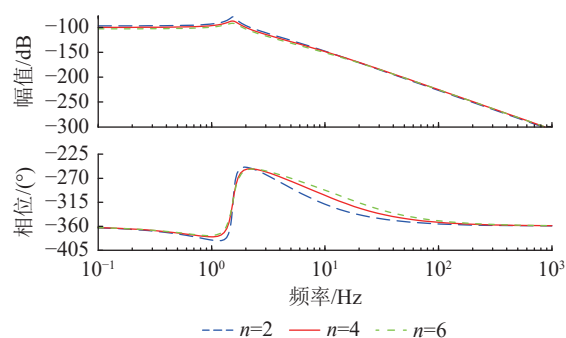


图10 不同 n 下 $B_{ji}(s)$ 的伯德图

Fig.10 Bode plots of $B_{ji}(s)$ for different n

由图10看出,随着 VSG 并网台数 n 的增加,低频段的谐振幅值降低,增加了系统的稳定裕度。因

此,随着 n 的增加,不同 VSG 间的功率耦合交互对频率的影响有所降低。

将式(17)改写为多 VSG 输出角频率传递函数矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_1(s) \\ \hat{\omega}_2(s) \\ \vdots \\ \hat{\omega}_{n-1}(s) \\ \hat{\omega}_n(s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} P_1(s) & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & P_2(s) & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{(n-1)1} & B_{(n-1)2} & \cdots & B_{(n-1)n} \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & P_n(s) \end{bmatrix}}_{L(s)} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega}_g(s) \\ \hat{\omega}_g(s) \\ \vdots \\ \hat{\omega}_g(s) \\ \hat{\omega}_g(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $L(s)$ 为功率耦合交互的传递函数矩阵。根据式(19)可得到多 VSG 并网 ω - P/Q 影响示意,如图 11 所示。多 VSG 功率耦合交互是一个多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统,每条 VSG 通路都会和其他通路相互影响,通过分析耦合传递函数 $P_j(s)$ 、 $B_{ji}(s)$,可以得出不同 VSG 间功率耦合交互对输出角频率的影响。

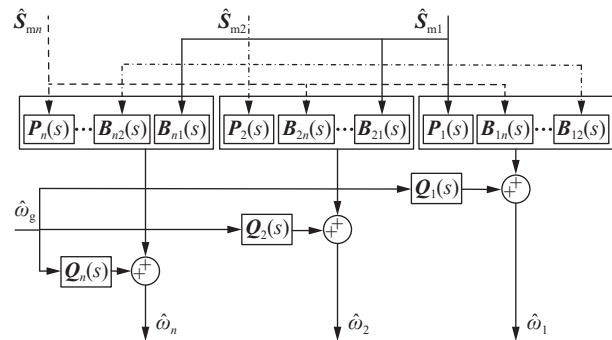


图 11 多 VSG 并网 ω - P/Q 影响示意

Fig. 11 Schematic diagram of ω - P/Q in multi-VSG grid-connected system

多 VSG 功率耦合交互模型与图 4 的单 VSG 功率耦合小信号模型形成对比,描述了多 VSG 系统下功率耦合的不同路径,为多 VSG 间交互影响建模提供了参考。下文针对多 VSG 功率耦合交互对输出角频率的影响展开分析。

2 多 VSG 交互的角频率影响因素分析

自动控制理论中常用 RGA 方法量化分析 MIMO 系统中各通道间的耦合程度。但 RGA 仅给出各通道间的静态耦合增益,无法准确描述动态系

统的耦合特性^[28]。文中考虑 VSG 在不同频率下 ω - P/Q 变化的特点,提出采用 DRGA 法定量分析系统耦合程度。

根据式(19)的传递函数矩阵,可计算出交互回路的动态相对增益矩阵 A 为:

$$A = L(s) \otimes (L(s)^{-1})^T \quad (20)$$

式中: \otimes 表示 Hadamard 积。

矩阵 A 由不同通道的交互增益 λ_{ij} 组成, λ_{ij} 的值越趋近于 0,说明通道 i 和 j 之间的交互耦合影响越小,反之则耦合程度越大。具体表达式为:

$$A = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中,对角线值 λ_{ii} 表示系统输出角频率受自身功率耦合的影响程度;非对角线值 λ_{ij} 表示系统输出角频率受其他 VSG 功率交互的影响程度。

由以上理论可知,DRGA 中的元素表示各通道间的耦合程度。根据交互的耦合传递函数得出,影响 VSG 控制环路交互作用的主要因素有 J 、 D_p 、 K 和 D_q ,在不同影响因素变化的情况下,可由 DRGA 计算出有功功率、无功功率对输出角频率的影响程度。文中仅考虑不同 VSG 间的功率交互影响,因此将 λ_{12} 作为分析对象,分析不同参数变化时相对增益值 λ_{12} 的变化规律,如图 12 所示,幅值均为绝对值。

如图 12(a) 所示,虚拟惯量 J 增大时,谐振幅值减小,且向着频率降低的方向移动,说明 VSG 间的功率耦合交互影响逐渐降低,VSG 输出角频率受其他 VSG 功率耦合影响变小,同时振荡频率发生变化。图 12(b) 中,有功阻尼系数 D_p 增大时,出现 2 个相对增益幅值点,第一个峰值随着 D_p 的增大而减小,可以降低 VSG 间功率耦合交互的影响;第二个峰值会随着 D_p 的增大而减小,增强了 VSG 间交互作用。并且改变 D_p 几乎不会改变谐振频率的位置,这是因为 VSG 在一次调频要求、功率振荡抑制和动态响应时间之间存在固有的权衡,限制了 D_p 在消除交互耦合引起的振荡方面的作用。图 12(c) 中,无功下垂系数 D_q 在初始功率交互下会呈现不同的耦合影响,随着 D_q 的减小,相对增益值的谐振峰值减小,说明 VSG 间交互影响降低。图 12(d) 中,虚拟励磁调节系数 K 减小时,控制通道间交互影响变小,VSG 间功率耦合对输出角频率影响减少。另外,图 12 中谐振峰值发生在低频段,因此在高频段,功率耦合交互不受主要参数的影响。

3 仿真实验

为验证所提模型的有效性和多 VSG 并网下功

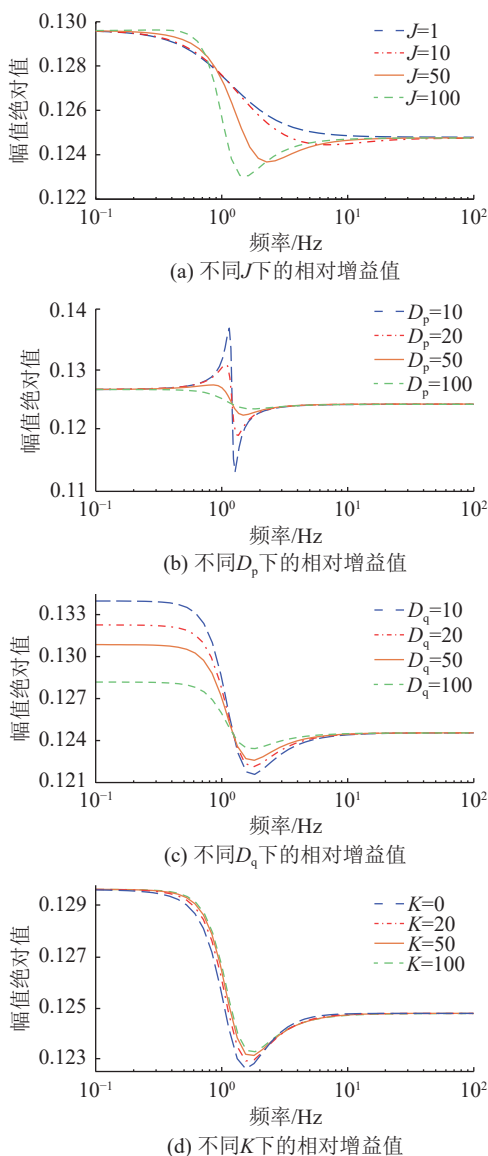


图 12 主要参数变化时相对增益值 λ_{12}
Fig.12 The relative gain value λ_{12} when the main parameter changes

率耦合交互对角频率振荡特性分析的正确性,在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建如图 1 所示的 3 台 VSG 系统的拓扑模型。仿真验证以下方案: (1) 单台 VSG 并网下主要参数变化时,验证功率耦合对角频率影响的正确性; (2) 多 VSG 功率耦合下,验证功率耦合交互对角频率振荡影响的正确性。

3.1 功率耦合下主要参数对单 VSG 功频的振荡特性分析

初始状态下,只有 VSG₁ 投入运行。工况 1: VSG₁ 在 $t = 10$ s 时受到有功功率指令 $\Delta P_m = 30$ kW 的阶跃扰动;工况 2: VSG₁ 在 $t = 10$ s 时受到无功功率指令 $\Delta Q_m = 1$ kW 的阶跃扰动。

图 13 为工况 1 下的输出波形。图 13(a)中,当有功指令发生阶跃扰动时,无功功率实际值与额定

工作点之间的偏差随着 D_p 的增大而减小。当 $D_p = 400$ 时,偏差约为 $\Delta Q = 1.2$ kW,当 $D_p = 200$ 时,偏差达到 2.1 kW,说明随着 D_p 减小,动态功率耦合加剧。图 13(b)中,随着 D_p 的减小,角频率的振荡幅度和振荡时间增大,将导致系统动态性能恶化、稳定性降低。

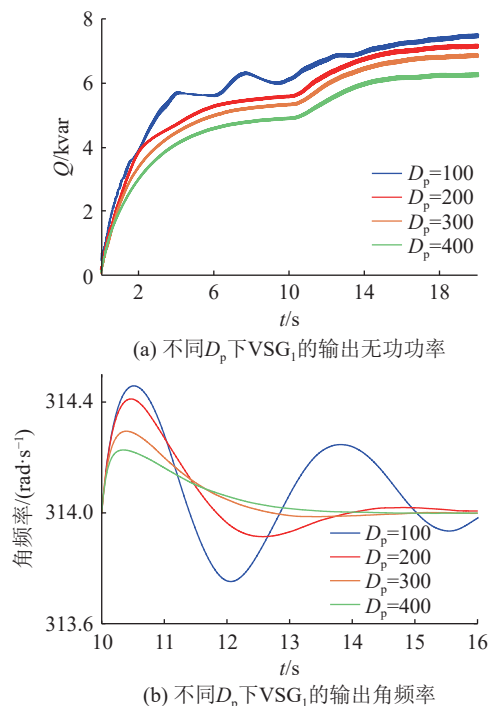
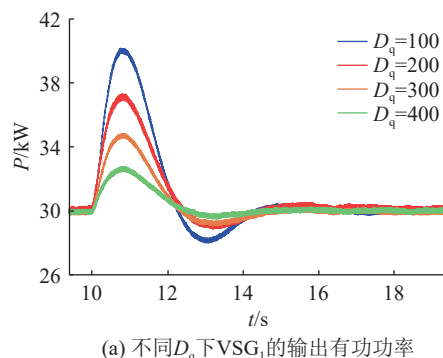
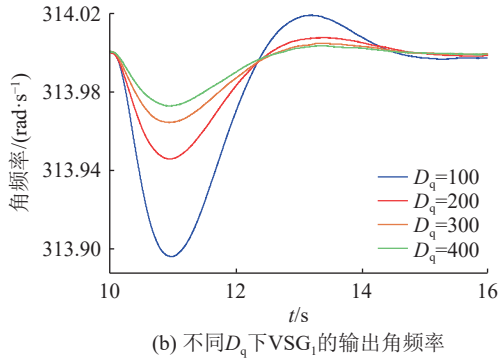


图 13 不同 D_p 下 VSG₁ 的输出无功功率和角频率
Fig.13 Reactive power and angular frequency output of VSG₁ under different D_p

图 14 为工况 2 下的输出波形。当无功指令发生阶跃扰动时,有功功率将引起动态振荡,由于有功功率环是无差控制,功率耦合不会产生有功功率的稳态偏差。图 14(a)中,随着 D_q 的减小,有功功率的最大动态偏差和动态调整时间增加。当 $D_q = 400$ 时,最大功率偏差约为 $\Delta P = 2.4$ kW,而当 $D_q = 100$ 时,最大功率偏差约为 $\Delta P = 10$ kW。图 14(b)中,角频率的振荡特性与有功功率相似,这表明 D_q 减小会加剧系统间的功率耦合,从而降低系统频率的稳定性。



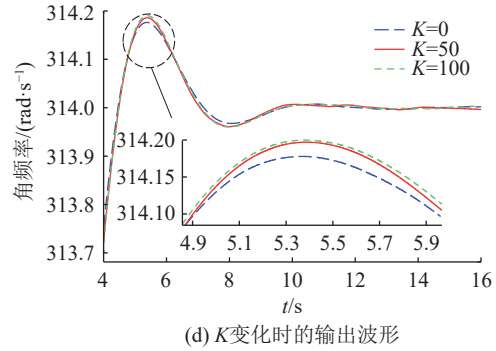
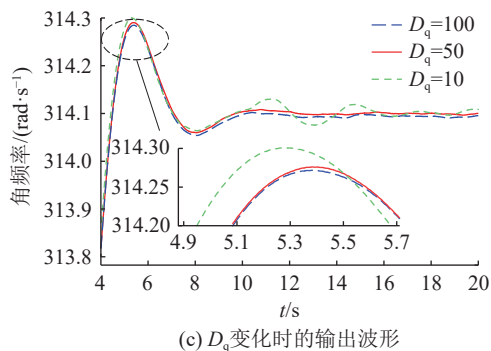
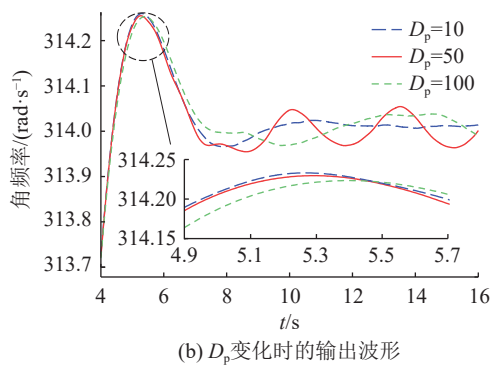
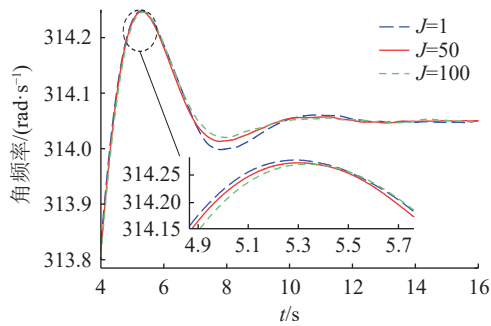
(a) 不同 D_q 下 VSG₁ 的输出有功功率

图 14 不同 D_q 下 VSG₁ 的输出有功功率和角频率Fig.14 Active power and angular frequency output of VSG₁ under different D_q

3.2 功率耦合下关键参数对多 VSG 角频率的交互影响

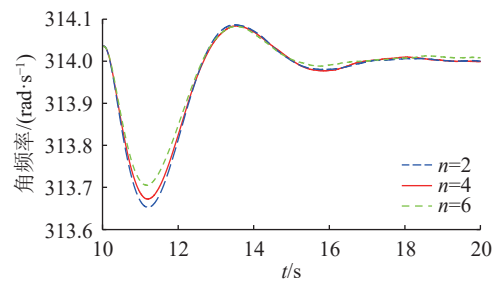
在 PSCAD 中搭建 3 台 VSG 并联系统仿真模型, 各 VSG 的参数一致。 $t = 4$ s 时, 对 VSG₁ 施加无功指令 $\Delta Q_m = 6$ kW 的阶跃扰动, 绘制 VSG₂ 的输出角频率波形, 如图 15 所示。

图 15(a) 中, J 增大时, VSG₂ 的角频率振幅逐渐

图 15 多 VSG 下不同参数变化时 VSG₂ 的输出角频率Fig.15 Angular frequency output of VSG₂ with different parameter under multi-VSGs

减小, 表明不同 VSG 控制通道之间的相互作用逐渐减弱。图 15(b) 中, D_p 增大时, VSG₂ 的角频率振幅减小, 但 $D_p = 50$ 和 $D_p = 100$ 时, 会出现角频率的动态波动, 这是因为随着 D_p 的增大, 2 个相对增益峰值振幅对 VSG 之间的相互作用产生了相反的影响。图 15(c) 中, D_q 增大时, VSG₂ 的角频率振幅逐渐减小, 且 $D_q = 10$ 时, 角频率的波动时间增加。图 15(d) 中, K 增大时, VSG₂ 的角频率振幅逐渐增大, 不同 VSG 之间的功率耦合交互作用增强。分析结果与图 12 的分析一致, 验证了理论的正确性。

图 16 为不同数量的 VSG 并网的角频率波形。扰动发生后, 角频率响应幅值随着 n 的增大而逐渐减小, 表明不同 VSG 控制通道间的相互作用逐渐减弱, 分析结果与图 10 的分析一致。

图 16 不同 n 的 VSG 并网的角频率
Fig.16 Angular frequency of grid-connected VSGs with different n

3.3 模型对比验证

上文分别验证了单 VSG 功率耦合动态响应和多 VSG 功率耦合交互对频率的影响, 本节通过对比现有不考虑固有功率耦合的模型(文献[19]模型), 进一步凸显考虑功率耦合情况下的系统的动态变化特性。图 17 为单 VSG 系统电压扰动时不同模型有功功率变化, 仿真工况设定为 $t = 10$ s 时, 电压系统额定电压跌落 5%, 系统参数见表 1, 对比单 VSG 并网时相同扰动下不同模型的动态变化。图 18 为多 VSG 系统电压扰动时不同模型的角频率变

化,通过 PSCAD 建立 3 台 VSG 并网模型, $t = 10$ s 时, VSG₁ 中电压跌落 5%, 绘制不同模型的 VSG₂ 的角频率动态波形。

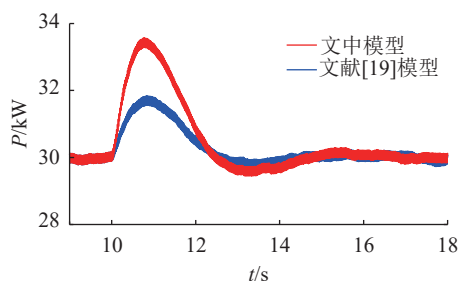


图 17 单 VSG 系统电压扰动时不同模型的有功功率
Fig.17 The active power of different models when the voltage of single VSG system is disturbed

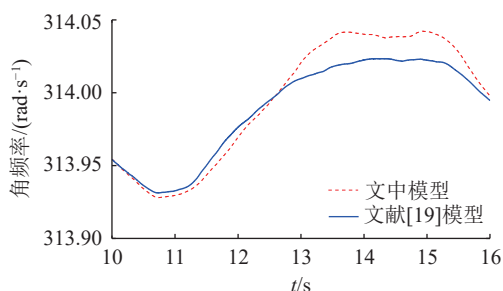


图 18 多 VSG 系统电压扰动时不同模型的角频率
Fig.18 Angular frequency of different models when the voltage of multi-VSG system is disturbed

从图 17 可以看出,扰动发生时,文中模型的有功功率产生更高的超调量。因此与不考虑功率耦合对比,功率耦合会带给系统更强的振荡波动。同理,从图 18 可以看出,在多 VSG 并联系统中,文中模型的角频率变化的振荡幅值仍高于文献[19],进一步说明了功率耦合会加深系统的振荡。

4 结论

文中建立考虑功率耦合的单 VSG 并网的功频振荡模型,并扩展至多 VSG 并网阻抗模型,研究了多 VSG 并网下功率耦合对不同控制通道的角频率的交互影响。相关结论如下:

(1) 基于单 VSG 功率耦合模型,建立功率耦合下有功与无功功率的交互模型,通过传递函数的伯德图频域分析,得出系统不同参数变化对功率耦合程度的影响,并通过建立多 VSG 阻抗模型,揭示了多 VSG 下输出角频率主要受自身功率、交互功率和电网角频率的影响。

(2) 采用 DRGA 理论量化分析多 VSG 之间系统动态的耦合程度大小。不同频段 VSG 通道间的交互影响有所不同,在高频段,系统主要参数对耦合程度影响不显著;在低频段(0~10 Hz),系统主要参数对功率耦合的影响程度较为显著。

(3) 在多 VSG 的功率耦合阻抗模型中,角频率受不同通道间的功率影响强弱与系统参数密切相关。其中,虚拟惯量 J 、有功阻尼系数 D_p 、无功下垂系数 D_q 和虚拟励磁调节系数 K 对 VSG 间交互影响较大。较低的 J 、 D_p 和 D_q 值会加深系统功率耦合,较高的 K 值会降低系统功率耦合。因此,在保证系统控制性能的前提下,参数 J 、 D_p 和 D_q 尽量设计较大,参数 K 尽量设计较小,以减弱 VSG 间功率耦合交互影响。

下一步的研究工作将是在多 VSG 系统中进行动态解耦,消除功率回路之间的耦合,提高 VSG 系统的稳定性。

参考文献:

[1] 张宇,蔡旭,张琛,等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1701.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701.

[2] 沈赋,李施伟,王健,等. 融合储能的光伏发电系统并网逆变器建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 131-143.
SHEN Fu, LI Shiwei, WANG Jian, et al. Modeling and stability analysis of a photovoltaic grid-connected inverter integrated with an energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 131-143.

[3] 杨效,曾成碧,赖辉,等. 弱电网下基于谐波状态空间模型的光储—虚拟同步发电机稳定性分析与优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 34-47.
YANG Xiao, ZENG Chengbi, LAI Hui, et al. A stability analysis method and optimal control of a photovoltaic energy storage-virtual synchronous generator based on a harmonic state space model in a weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 34-47.

[4] 戎士洋,范辉,梁纪峰,等. 多 VSG 单元的惯量协调控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 170-180.
RONG Shiyang, FAN Hui, LIANG Jifeng, et al. Research on inertia coordinated control strategy of multiple VSG cells[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 170-180.

[5] 王立娜,王逸超,谭丽平,等. 基于自适应指数函数的变参数 VSG 控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 124-131.
WANG Lina, WANG Yichao, TAN Liping, et al. Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 124-131.

[6] 闫来清,邓熙炜,赵喆,等. 基于自适应前馈补偿的 VSG 功率解耦控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 64-73.
YAN Laiqing, DENG Xiwei, ZHAO Zhe, et al. VSG power decoupling control strategy based on adaptive feedforward

- compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(24): 64-73.
- [7] 李劲松, 许新雨, 李国锋, 等. 基于自适应电流补偿的VSG增强功率解耦控制策略研究[J/OL]. *电机与控制学报*: 1-15[2024-09-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.tm.20240929.1413.002.html>.
LI Jinsong, XU Xinyu, LI Guofeng, et al. Research on VSG enhanced power decoupling control strategy based on adaptive current compensation[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1-15[2024-09-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.tm.20240929.1413.002.html>.
- [8] 符杨, 陈禹瑾, 季亮, 等. 考虑功率解耦的构网型逆变器的低压穿越控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(15): 1-13.
FU Yang, CHEN Yujin, JI Liang, et al. Low voltage ride-through control strategy of a grid-forming inverter considering power decoupling[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 1-13.
- [9] YANG Y Q, XU J Z, LI C, et al. A new virtual inductance control method for frequency stabilization of grid-forming virtual synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 70(1): 441-451.
- [10] 孟潇潇, 王煜琛, 毛荀, 等. 考虑虚拟阻抗功率解耦的构网型变流器暂态稳定分析及控制[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(24): 101-111.
MENG Xiaoxiao, WANG Yuchen, MAO Xun, et al. Transient stability analysis and control of grid-forming converter considering virtual impedance power decoupling[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(24): 101-111.
- [11] 曾德银, 姚骏, 张田, 等. 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[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.
ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.
- [12] 刘志坚, 骆军, 梁宁, 等. 虚拟同步控制对风电并网系统次同步振荡阻尼影响分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(1): 135-142.
LIU Zhijian, LUO Jun, LIANG Ning, et al. Analysis of influence of virtual synchronous control on subsynchronous oscillation damping for grid-connected wind power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(1): 135-142.
- [13] 涂春鸣, 谢伟杰, 肖凡, 等. 多虚拟同步发电机并联系统控制参数对稳定性的影响分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(15): 77-86.
TU Chunming, XIE Weijie, XIAO Fan, et al. Influence analysis of control parameters of parallel system with multiple virtual synchronous generators on stability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(15): 77-86.
- [14] 马也, 史丽萍, 李衡, 等. 基于VSG控制的微网逆变器工频振荡现象研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 107-115.
MA Ye, SHI Liping, LI Heng, et al. Power frequency oscillation of a microgrid inverter based on VSG control[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 107-115.
- [15] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能VSG并网有功振荡抑制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(14): 118-126.
SHI Rongliang, LAN Caihua, WANG Guobin, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 118-126.
- [16] 秦本双, 徐永海, 贾焦心. 多VSG功频环路间交互影响的定量分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 757-764.
QIN Benshuang, XU Yonghai, JIA Jiaoxin. Quantitative analysis on interactive influences among power-frequency loops of multi-VSG[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 757-764.
- [17] 秦本双, 徐永海, 袁敞, 等. 多VSG并网系统的P/ω导纳建模及功频振荡分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2932-2942.
QIN Benshuang, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. The P/ω admittance modeling and power-frequency oscillation analysis of multi-VSGs grid-connected systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2932-2942.
- [18] 颜湘武, 贾焦心, 王俣珂, 等. 基于频域特性测试的VSG功频传递函数辨识方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4239-4250.
YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, WANG Yuke, et al. A VSG power frequency transfer function identification method based on characteristic test in frequency domain[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4239-4250.
- [19] JIA J X, YAN X W, QIN B S, et al. Modeling and analysis of the torque-frequency dynamics for multi-VSC parallel system based on the equivalent admittance[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(5): 3597-3607.
- [20] LONG B, ZHU S H, RODRIGUEZ J, et al. Enhancement of power decoupling for virtual synchronous generator: a virtual inductor and virtual capacitor approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(7): 6830-6843.
- [21] ZHANG Z H, LIU X B, SUN Y. Enhanced power decoupling control for virtual synchronous generator considering resistive-inductive line impedance in weak grids[C]//2023 3rd International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE). Huzhou, China. IEEE, 2023: 269-272.
- [22] 姜静雅, 王玮, 吴学智, 等. 基于自适应无功功率补偿的虚拟同步机功率解耦策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(13): 2747-2756.
JIANG Jingya, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Power decoupling strategy in virtual synchronous generator based on adaptive reactive power compensation[J]. *Transactions of China*

- Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2747-2756.
- [23] FU S Q, SUN Y, LIN J H, et al. P/Q- ω /V admittance modeling and oscillation analysis for multi-VSG grid-connected system [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5849-5859.
- [24] LI M X, WANG Y, HU W H, et al. Unified modeling and analysis of dynamic power coupling for grid-forming converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(2): 2321-2337.
- [25] LONG B, YANG W D, ZHU S H, et al. Power-frequency admittance model of multi-VSGs grid-connected system considering power coupling [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 155: 109513.
- [26] 杜建鹏, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于虚拟功角功率控制的 VSG 增强功率解耦策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(22): 8808-8819.
- DU Jianpeng, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. Enhanced power decoupling strategy for VSG with power control based on virtual power angle [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(22): 8808-8819.
- [27] 张林, 张海波, 蒋维勇, 等. 基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步机功率解耦策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(15): 6010-6023.
- ZHANG Lin, ZHANG Haibo, JIANG Weiyong, et al. Power decoupling strategy for virtual synchronous generator based on adaptive dynamic virtual synchronous impedance [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(15): 6010-6023.
- [28] 张雪原, 颜湘武, 张波, 等. 基于动态相对增益的逆变器耦合评价与解耦方法 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(7): 110-117.
- ZHANG Xueyuan, YAN Xiangwu, ZHANG Bo, et al. Inverter coupling evaluation and decoupling method based on dynamic relative gain [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(7): 110-117.

作者简介:



李威

李威(2000), 男, 硕士, 研究方向为新能源并网稳定性与变流器控制方法(E-mail: L1524691000@163.com);

马美玲(1990), 女, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网系统稳定性分析与控制和电力系统安全性与可靠性;

孙伟卿(1985), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统评估与优化、电力储能应用技术和低碳电力系统。

Analysis of frequency oscillation characteristics in grid-forming multi-VSG systems considering power coupling

LI Wei¹, MA Meiling^{1,2}, SUN Weiqing¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (SJTU), Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: Grid-forming converters controlled by virtual synchronous generator (VSG) provide a certain amount of inertia and damping support for new energy sources to be connected to the grid. However, the power coupling generated by the VSG control link causes system frequency oscillation, which can seriously threaten the system safety. To solve the unclear mechanism of power coupling interaction on frequency oscillation when multi-VSGs are connected to the grid, a method of impedance modeling of multi-VSG grid-connected system considering power coupling is proposed. The frequency oscillation characteristics are analyzed by combining with parameters changes. Firstly, the power coupling mechanism of single VSG is analyzed. Then the impedance model of multi-VSG grid-connected system is established which reveals that output angular frequency under multi-VSGs is mainly affected by three parts: its own power, interacting power and grid angular frequency. In addition, a method based on the dynamic relative gain array is proposed to quantitatively analyze the laws of system parameter variations on the interaction effects among VSGs. The study reveals the impact trends of parameter variations in multi-VSG systems on system coupling interactions across high-frequency and low-frequency bands. Finally, the accuracy of the theoretical analysis is verified by time-domain simulation of a three-VSG grid-connected system model constructed in PSCAD.

Keywords: virtual synchronous generator (VSG); grid-forming converters; power coupling; impedance model; frequency oscillation; dynamic relative gain array

(编辑 方晶)