

虚拟同步发电机输出阻抗建模与弱电网适应性研究

韩 刚, 蔡 旭

(上海交通大学 风力发电研究中心, 上海 200240)

摘要: 研究了弱电网条件下虚拟同步发电机-电网互联系统的交互稳定性。在考虑主电路参数、控制参数等因素影响的基础上, 提出一种 dq 旋转坐标系下虚拟同步发电机的输出阻抗模型, 并推导其解析表达式。分析了该输出阻抗的频率特性, 得出虚拟同步机在弱电网下运行易失稳的结论。基于广义奈奎斯特判据研究电网强度及功率环控制参数对虚拟同步机运行稳定性的影响, 以此为依据提出一种基于增大有功环参数的虚拟同步机致稳控制方法, 从而提高其弱电网运行的适应性。基于 RTDS 的硬件在环仿真平台进行仿真计算, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 虚拟同步发电机; 弱电网; 阻抗建模; 交互稳定性

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.016

0 引言

随着新能源发电技术的不断发展, 越来越多的可再生能源(风电、光伏等)通过电力电子变流器接入电网^[1]。与此同时, 不同的变流器控制策略相继被提出。其中, 基于电网电压定向的矢量控制方式具有响应快速、有功无功控制解耦等优势^[2], 逐渐成为并网变流器的主要控制策略。然而, 该控制策略下的变流器不具备自治运行能力, 并且在电网出现有功功率供需失衡时无法提供惯量, 限制了可再生能源接入电网的比例^[3-5]。因此, 亟需探讨一种可再生能源并网同步运行的新机制。

近年来, 一类名为“虚拟同步发电机 VSG(Virtual Synchronous Generator)”的变流器控制算法逐渐得到关注^[6]。这种控制算法通过在控制环路中引入励磁常数、惯量、阻尼系数等参数, 有效地模拟了同步发电机的机电特性, 使变流器具备了向系统注入惯量的功能, 且无需锁相环的同步作用^[7-8]。文献[9-10]引入虚拟阻抗对连接线路进行重塑, 实现了 VSG 的功率解耦控制。文献[11]研究了虚拟阻抗的频带特性, 通过合理的设计使连接线路呈现较大稳态阻抗和较小的动态阻抗, 从而提高了多变流器系统的均流性能。文献[12]采用小信号分析方法, 研究了 VSG 控制参数对闭环系统极点分布的影响, 并以此为依据设计控制参数。文献[13]在兼顾系统稳定性、动态性能以及功率脉动抑制能力的基础上, 提出一种 VSG 的参数设计方法。文献[14]通过引入 VSG 的自适应惯量, 消除了功率响应过程中的低频振荡, 极大地提高了系统稳定性。上述文献[9-14]在对 VSG 引入虚拟阻抗控制以及进行控制参数设计时, 均基于理想电网环境, 即强电网。然而, 上述文献均未考虑弱

电网条件下 VSG-电网互联系统存在的交互稳定性。阻抗分析法广泛用于研究互联系统的交互稳定性, 具有阻抗易于实际测量、物理意义明确等优势^[15]。文献[16]在稳态工作点建立直流变换器的小信号阻抗模型, 以此为基础分析直流分布式供电系统的稳定性。对于交流系统在自然坐标系下不存在稳态工作点的问题, 文献[17]在 dq 旋转坐标系下建立了三相逆变器的阻抗模型, 并提出根据回率矩阵判断三相交流互联系统的稳定性。进一步地, 文献[18]建立了传统矢量控制下三相逆变器的 dq 阻抗模型, 分析了锁相环带宽等参数对逆变器-电网互联系统稳定性的影响。

针对目前 VSG 控制结构及参数设计等研究^[6-14]基于强电网环境的问题, 本文研究弱电网条件下 VSG-电网互联系统的交互稳定性。首先, 基于 VSG 的一种控制结构, 提出了该 VSG 在 dq 旋转坐标系下的输出阻抗模型; 然后, 根据广义奈奎斯特判据, 分析了电网强度、功率控制参数对 VSG 运行稳定性的影响, 得出 VSG 在弱电网环境下运行失稳的结论; 接着, 提出一种通过适当增大有功环控制参数以提高 VSG 弱电网适应性的方法; 最后, 基于实时数字仿真仪(RTDS)硬件在环(HIL)实时仿真平台, 验证了理论分析的正确性。

1 VSG 控制结构

并网逆变器的 VSG 控制模拟了电力系统同步发电机的惯量、一次调频及一次调压特性。图 1 给出了基于 VSG 控制的并网逆变器主电路拓扑和控制结构, 这种控制策略以有功功率 P 、无功功率 Q 为控制目标。图 1 中, L 为并网逆变器的滤波电感; L_g 为电网线路电感; P_{ref} 、 Q_{ref} 为并网逆变器输出功率参考值; U_{dc} 为直流母线电压; e_a 、 e_b 、 e_c 为逆变器交流侧

输出电压; e_{am}, e_{bm}, e_{cm} 为逆变器交流侧输出电压的调制信号; u_a, u_b, u_c 为逆变器并网点电压; u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 为电网电压; i_a, i_b, i_c 为逆变器并网电流。

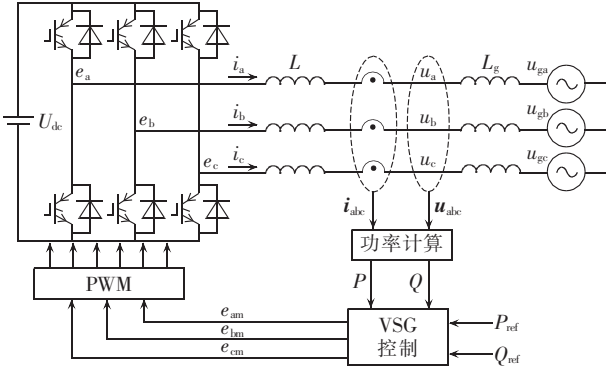


图 1 VSG 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of VSG structure

图 1 所示的 VSG 中,将逆变器交流侧输出电压 e_a, e_b, e_c 等效为同步发电机的空载电动势,滤波电感 L 等效为同步发电机的同步电抗,逆变器并网点电压 u_a, u_b, u_c 等效为同步发电机的机端电压。基于 VSG 控制的逆变器并网输出有功功率 P 、无功功率 Q 可分别表示为:

$$P = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_b - u_c) i_a + (u_c - u_a) i_b + (u_a - u_b) i_c] \quad (2)$$

图 2 进一步给出了 VSG 的详细控制框图。图中, H 为虚拟惯量时间常数; D_p 为虚拟阻尼系数; K 为无功功率控制常数; D_Q 为无功-电压下垂系数; ω_0 为电网额定角频率; ω 为 VSG 实际输出角频率; U_g 为电网额定电压幅值; E_m 为 VSG 输出空载电动势的幅值; θ 为 VSG 输出空载电动势的相位。

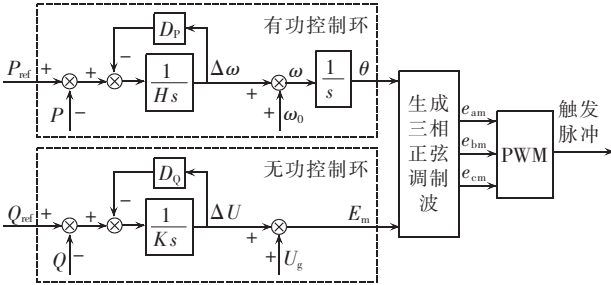


图 2 VSG 控制框图

Fig.2 Control diagram of VSG

2 VSG 输出阻抗建模

为了分析 VSG 在弱电网环境下的运行稳定性,本文在 dq 旋转坐标系下建立其输出阻抗的小信号模型。VSG 输出阻抗建模原理如下:在逆变器与电网公共连接点处注入小信号的谐波电压扰动,该扰动经过控制回路以及主电路,在逆变器输出电流中产生谐波电流响应。通过分析谐波电压、谐波电流

的幅值与相位,即可求取出 VSG 输出阻抗的频率特性。图 3 给出了 VSG 控制下逆变器的小信号模型(文中带“^”的变量均表示该变量的扰动量)。

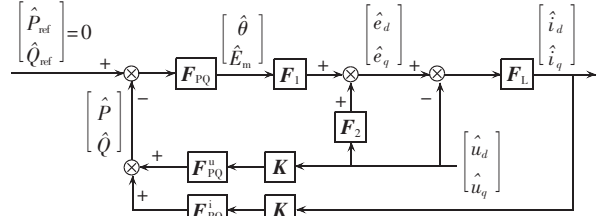


图 3 VSG 控制下逆变器小信号模型

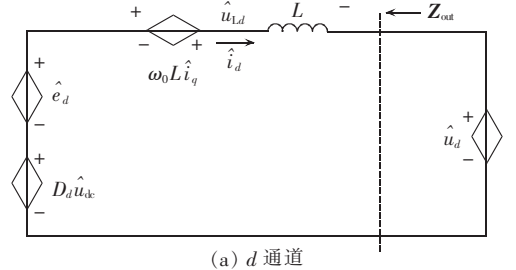
Fig.3 Small-signal model of inverter under control of VSG

图 3 所示的逆变器小信号模型中,小信号扰动项为包含 d 轴、 q 轴分量的列向量,由于在整个控制过程中有功功率 P 、无功功率 Q 的指令信号不变,可认为功率指令的扰动项为 0。需要注意的是,图 3 中 $F_{PQ}, F_1, F_2, F_L, K, F_{PQ}^u, F_{PQ}^i$ 表示的是 2×2 阶传递函数方阵,其物理含义与解析表达式将在下文给出。根据逆变器输出阻抗的定义,电压扰动向量 $[\hat{u}_d, \hat{u}_q]^T$ 、电流响应向量 $[\hat{i}_d, \hat{i}_q]^T$ 以及输出阻抗 Z_{out} 的关系可表示为:

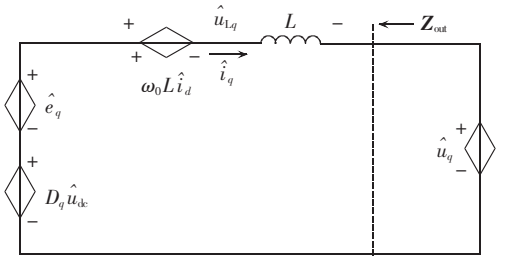
$$\begin{bmatrix} \hat{u}_d \\ \hat{u}_q \end{bmatrix} = -Z_{out} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,逆变器输出阻抗 Z_{out} 为 2×2 阶方阵,下文将对其推导过程进行详细阐述。

图 4 给出了 dq 旋转坐标系下逆变器主电路的小信号模型,由于假定直流母线电压恒定,本文仅分析交流侧主电路的动态特性,则图 4 中直流母线电压的扰动量 $\hat{u}_{dc}$ 置为 0。图 3 中 F_L 为电压向量 $[\hat{u}_{Ld}, \hat{u}_{Lq}]^T$



(a) d 通道



(b) q 通道

图 4 dq 旋转坐标系下逆变器交流侧主电路小信号模型

Fig.4 Small-signal model of inverter's AC-side main circuit in dq rotating coordinate system

到电流向量 $[\hat{i}_d, \hat{i}_q]^T$ 的传递函数矩阵, 根据图 4 所示的电压、电流关系可得 F_L 的表达式如下:

$$F_L = \frac{1}{s^2 L^2 + \omega_0^2 L^2} \begin{bmatrix} sL & \omega_0 L \\ -\omega_0 L & sL \end{bmatrix} \quad (4)$$

图 3 中 K 为用于电压、电流采样信号调理的滤波器传递函数矩阵, 本文采用抗混叠模拟低通滤波器, 其表达式为:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1}{(sT_1+1)(sT_2+1)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(sT_1+1)(sT_2+1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, T_1, T_2 为滤波时间常数。

在 dq 旋转坐标系下, 稳态工作时的并网逆变器输出有功功率为额定值 P_0 , 输出无功功率为额定值 Q_0 , 并网点的电压和电流分别为 U_d, U_q 和 I_d, I_q , 在上述稳态工作点注入小信号扰动可得:

$$P_0 + \hat{P} = \frac{3}{2} (I_d + \hat{i}_d) (U_d + \hat{u}_d) + \frac{3}{2} (I_q + \hat{i}_q) (U_q + \hat{u}_q) \quad (6)$$

$$Q_0 + \hat{Q} = \frac{3}{2} (I_d + \hat{i}_d) (U_q + \hat{u}_q) - \frac{3}{2} (I_q + \hat{i}_q) (U_d + \hat{u}_d) \quad (7)$$

将式(6)、(7)展开, 消去稳态值可得如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} \hat{P} \\ \hat{Q} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_d & U_q \\ U_q & -U_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_d & I_q \\ -I_q & I_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_d \\ \hat{u}_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

图 3 中 F_{PQ}^u, F_{PQ}^i 为用于功率计算的小信号传递函数矩阵, 根据图 3 所示的小信号模型以及式(8)可得 F_{PQ}^u, F_{PQ}^i 的表达式如下:

$$F_{PQ}^u = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_d & I_q \\ -I_q & I_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F_{PQ}^i = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_d & U_q \\ U_q & -U_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

图 3 中 F_{PQ} 为功率控制器传递函数矩阵, 对图 2 中 VSG 有功控制环、无功控制环进行等效转换并做适当简化, 可得功率控制环等效简化框图如图 5 所示。

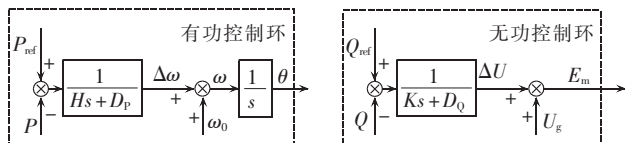


图 5 功率控制环等效简化框图

Fig.5 Equivalent simplified diagram of power control loop

VSG 的功率控制器可等效为一阶惯性环节, 由于图 5 中前馈项 ω_0, U_g 分别为电网角频率及电压的额定值, 在扰动项作用时其值不变。图 3 中 F_{PQ} 为功率向量 $-\begin{bmatrix} \hat{P} \\ \hat{Q} \end{bmatrix}^T$ 到向量 $\begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{E}_m \end{bmatrix}^T$ 的传递函数矩阵, 根据图 3、图 5 可得 F_{PQ} 的表达式为:

$$F_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Hs^2 + D_P s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Ks + D_Q} \end{bmatrix} \quad (11)$$

VSG 输出空载电动势的幅值扰动 $\hat{E}_m$ 与相位扰动 $\hat{\theta}$ 可转移到该空载电动势的 d 轴分量扰动 $\hat{e}_d$ 与 q 轴分量扰动 $\hat{e}_q$, 即:

$$E_d + \hat{e}_d = (E_m + \hat{E}_m) \cos(\theta + \hat{\theta} - \theta_0 - \hat{\theta}_0) \quad (12)$$

$$E_q + \hat{e}_q = (E_m + \hat{E}_m) \sin(\theta + \hat{\theta} - \theta_0 - \hat{\theta}_0) \quad (13)$$

其中, θ_0 为电网电压相位。

将式(12)展开如下:

$$E_d + \hat{e}_d = E_m \cos \delta \cos(\hat{\theta} - \hat{\theta}_0) + \hat{E}_m \cos \delta \cos(\hat{\theta} - \hat{\theta}_0) -$$

$$E_m \sin \delta \sin(\hat{\theta} - \hat{\theta}_0) - \hat{E}_m \sin \delta \sin(\hat{\theta} - \hat{\theta}_0) \quad (14)$$

舍去二阶小信号扰动项并消去稳态值可得:

$$\begin{aligned} \hat{e}_d = & -\hat{E}_m \hat{\theta} \sin \delta + \hat{E}_m \cos \delta + E_m \hat{\theta}_0 \sin \delta \approx \\ & -E_m \hat{\theta} \sin \delta + \hat{E}_m \cos \delta + \frac{E_m \sin \delta}{U_g} \hat{u}_q \end{aligned} \quad (15)$$

同理将式(13)展开, 进行近似等效并消去二阶小信号扰动项及稳态值可得:

$$\hat{e}_q = E_m \hat{\theta} \cos \delta + \hat{E}_m \sin \delta - \frac{E_m \cos \delta}{U_g} \hat{u}_q \quad (16)$$

将式(15)、(16)写成矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_d \\ \hat{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_m \sin \delta & \cos \delta \\ E_m \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{E}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{E_m \sin \delta}{U_g} \\ 0 & -\frac{E_m \cos \delta}{U_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_d \\ \hat{u}_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据图 3 所示的小信号模型以及式(17)中小信号扰动项之间的关系, 可得传递函数矩阵 F_1, F_2 的表达式为:

$$F_1 = \begin{bmatrix} -E_m \sin \delta & \cos \delta \\ E_m \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{E_m \sin \delta}{U_g} \\ 0 & -\frac{E_m \cos \delta}{U_g} \end{bmatrix} \quad (19)$$

根据式(3)给出的逆变器输出阻抗定义以及图 3 所示的小信号模型, 可求得 VSG 控制下逆变器输出阻抗 Z_{out} 的表达式为:

$$Z_{out} = -[F_L(F_2 - F_1 F_{PQ} F_{PQ}^u K - I)]^{-1} (F_L F_1 F_{PQ} F_{PQ}^i K + I) \quad (20)$$

3 输出阻抗频率特性

本节讨论 VSG 控制下逆变器输出阻抗的频率特性, 以此为依据分析其弱电网运行的稳定性并指

导 VSG 的参数设计。

以一台额定功率为 10 kW 的 VSG 为例,分析其输出阻抗的频率特性,该 VSG 的相关电气参数如下:电网额定电压幅值 $U_g=220$ V,电网频率 $f_0=50$ Hz,直流母线电压 $U_{dc}=750$ V,额定有功功率 $P=10$ kW,额定无功功率 $Q=0$,开关频率 $f_s=10$ kHz,滤波电感 $L=4.5$ mH。

根据逆变器实际的开关频率确定功率控制环路的频带宽度,以此为依据设计 VSG 控制参数^[13]:滤波时间常数 $T_1=1.59 \times 10^{-5}$ s,滤波时间常数 $T_2=1.59 \times 10^{-6}$ s,虚拟惯量常数 $H=6.4$ kg·m²·rad/s,虚拟阻尼系数 $D_p=1140$ N·m,无功功率控制常数 $K=5$ A·s,无功-电压下垂系数 $D_Q=150$ A。

电网强弱按照短路比 SCR(Short Circuit Ratio)进行区分,定义 SCR 为:

$$SCR = \frac{S_{SC}}{S_N} \quad (21)$$

其中, S_{SC} 为电网公共连接点处的短路容量; S_N 为电网接入设备的额定容量。在本文所取 VSG 额定容量为 10 kW 的情况下,对应的 S_N 为 10 kW。

通常情况下 $SCR>20$ 的电网认为是强电网, SCR 小于 6~10 的电网认为是弱电网^[19-20]。当电网线路电感 $L_g=15.4$ mH(标么值为 0.33 p.u.)时,电网短路容量 $S_{SC}=30$ kV·A,相对应的 $SCR=3$,以此可以模拟弱电网;当 $L_g=2.3$ mH(标么值为 0.05 p.u.)时,电网短路容量 $S_{SC}=200$ kV·A,相对应的 $SCR=20$,以此可以模拟强电网。电网阻抗传递函数矩阵 $\mathbf{Z}_g$ 可以表示为:

$$\mathbf{Z}_g = \begin{bmatrix} sL_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & sL_g \end{bmatrix} \quad (22)$$

图 6 给出了 VSG 输出阻抗 $\mathbf{Z}_{out}$ 与电网阻抗 $\mathbf{Z}_g$ 的波特图。从图 6 中可以看出,VSG 输出阻抗 $\mathbf{Z}_{out}$ 的 d - d 轴分量 Z_{dd} 在低频段呈现电阻特性,在高频段表现为交流电感特性; $\mathbf{Z}_{out}$ 的 q - q 轴分量 Z_{qq} 在低频段呈现负电阻特性,高频段也表现为交流电感特性。需要注意的是, Z_{qq} 的负电阻特性降低了 VSG 在低频段运行的稳定裕度,易与电网阻抗 $\mathbf{Z}_g$ 之间产生交互失稳现象。

实际上 Z_{dd} 的正电阻特性、 Z_{qq} 的负电阻特性由 VSG 的功率控制环路引起。在功率控制环路带宽以内可认为 VSG 输出有功功率恒定为 P_0 、输出无功功率恒定为 Q_0 ,此时公共连接点处的电压向量可以表示为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{i_d P_0 + i_q Q_0}{i_d^2 + i_q^2} \\ \frac{-i_d Q_0 + i_q P_0}{i_d^2 + i_q^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

采用双变量的泰勒级数对式(23)进行线性化,

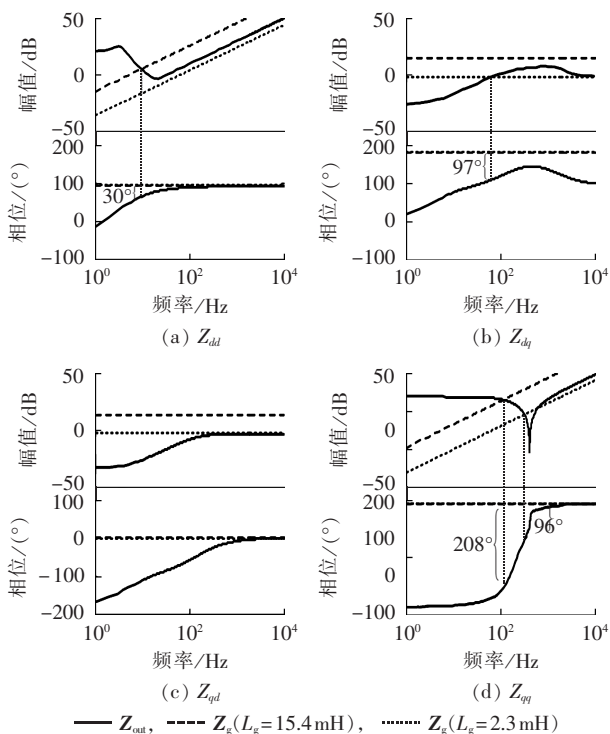


图 6 VSG 输出阻抗与电网阻抗波特图

Fig.6 Bode diagrams of VSG output impedance and grid impedance

并在稳态工作点附近展开至二次项可得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = F \left(\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right) \approx F \left(\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right) \Big|_{\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix}} + O_F \left(\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right) \Big|_{\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} + (-\mathbf{Z}_{out}) \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中, $F(\cdot)$ 表示泰勒级数展开运算; $F(\cdot) \Big|_{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}$ 表示泰勒级数展开式在工作点 $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 的稳态值; $O_F(\cdot) \Big|_{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}$ 表示泰勒级数展开式在工作点 $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 的余项值。经过计算可得 VSG 输出阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{out}$ 的直流量为:

$$\mathbf{Z}_{out}(0) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{P_0}{I_d^2} & 0 \\ 0 & -\frac{P_0}{I_d^2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

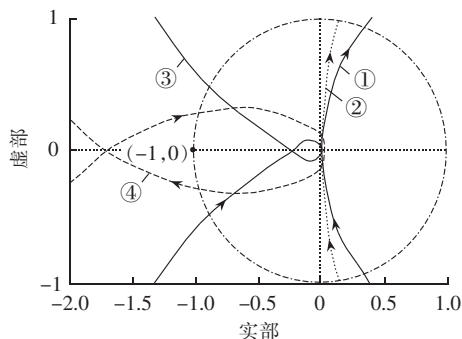
由式(25)可以看出,输出阻抗直流量的 d - d 轴分量 Z_{dd} 呈现正电阻特性,相反 q - q 轴分量 Z_{qq} 呈现负电阻特性。上述关于 Z_{dd} 、 Z_{qq} 的理论分析结果与图 6 所示 $\mathbf{Z}_{out}$ 的低频特性一致,验证了第 2 节所建 VSG 输出阻抗模型的正确性。

4 弱电网运行稳定性分析

VSG 并网运行的稳定性可通过回率矩阵 $\mathbf{Z}_g/\mathbf{Z}_{out}$ 是否满足广义奈奎斯特判据来判断^[21]。这种稳定性

判断方法是:回率矩阵含有 2 个特征根 λ_1, λ_2 , 如果该 2 个特征根在复平面上的轨迹均不顺时针包围点 $(-1, 0)$, 则系统稳定; 否则, 系统不稳定。

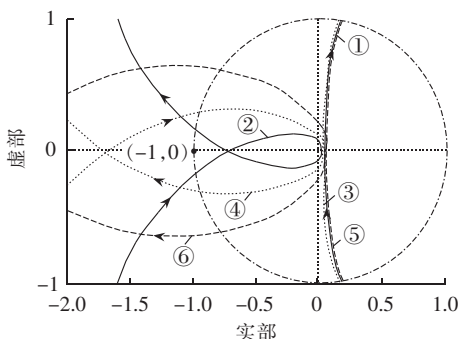
图 7 给出了不同电网强度下 2 个特征根的轨迹, 从图中可以看出, 强电网下 2 个特征根均未顺时针包围点 $(-1, 0)$, VSG-电网互联系统稳定; 弱电网下特征根 λ_2 顺时针包围点 $(-1, 0)$, 系统失稳。



① $\lambda_1 (L_g = 2.3 \text{ mH})$, ② $\lambda_1 (L_g = 15.4 \text{ mH})$
③ $\lambda_2 (L_g = 2.3 \text{ mH})$, ④ $\lambda_2 (L_g = 15.4 \text{ mH})$

图 7 不同电网强度下 Z_g/Z_{out} 的特征轨迹
Fig.7 Characteristic locus of Z_g/Z_{out} with different grid strengths

图 8 进一步分析了弱电网下有功环控制参数对系统稳定性的影响。从图中可以看出, 随着有功功率控制环惯量常数 H 、阻尼系数 D_p 的增大, 特征根 λ_1 的轨迹不变, 特征根 λ_2 由顺时针包围点 $(-1, 0)$ 状态变为非包围状态, 即 VSG-电网互联系统由失稳变为稳定。因此, 可通过增大有功环控制参数 H 、 D_p 以提高 VSG 弱电网环境下的运行稳定性。

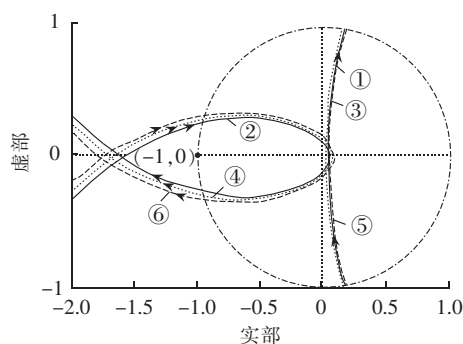


① $\lambda_1 (H = 12.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}, D_p = 2280 \text{ N} \cdot \text{m})$
② $\lambda_2 (H = 12.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}, D_p = 2280 \text{ N} \cdot \text{m})$
③ $\lambda_1 (H = 6.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}, D_p = 1140 \text{ N} \cdot \text{m})$
④ $\lambda_2 (H = 6.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}, D_p = 1140 \text{ N} \cdot \text{m})$
⑤ $\lambda_1 (H = 3.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}, D_p = 570 \text{ N} \cdot \text{m})$
⑥ $\lambda_2 (H = 3.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}, D_p = 570 \text{ N} \cdot \text{m})$

图 8 弱电网以及不同有功环控制参数下 Z_g/Z_{out} 的特征轨迹

Fig.8 Characteristic locus of Z_g/Z_{out} in a weak grid with different active loop parameters

图 9 为弱电网下无功环控制参数对系统稳定性的影响。从图中可以看出, 增大无功功率控制常数 K 、无功-电压下垂系数 D_0 , 特征根 λ_1 的轨迹不变,



① $\lambda_1 (K = 10 \text{ A} \cdot \text{s}, D_0 = 300 \text{ A})$
② $\lambda_2 (K = 10 \text{ A} \cdot \text{s}, D_0 = 300 \text{ A})$
③ $\lambda_1 (K = 5 \text{ A} \cdot \text{s}, D_0 = 150 \text{ A})$
④ $\lambda_2 (K = 5 \text{ A} \cdot \text{s}, D_0 = 150 \text{ A})$
⑤ $\lambda_1 (K = 2.5 \text{ A} \cdot \text{s}, D_0 = 75 \text{ A})$
⑥ $\lambda_2 (K = 2.5 \text{ A} \cdot \text{s}, D_0 = 75 \text{ A})$

图 9 弱电网以及不同无功环控制参数下 Z_g/Z_{out} 的特征轨迹

Fig.9 Characteristic locus of Z_g/Z_{out} in weak grid with different reactive loop parameters

特征根 λ_2 小幅度变化, 但仍然顺时针包围点 $(-1, 0)$, 即 VSG-电网互联系统处在失稳状态。因此, 无功环控制参数对 VSG 弱电网环境下的运行稳定性影响较小。

5 HIL 实时仿真验证

本文搭建了基于 RTDS 的 HIL 仿真平台, 以验证上述关于 VSG 弱电网运行稳定性分析的正确性。基于 RTDS 的 HIL 实时仿真平台架构如图 10 所示, VSG 主电路搭建在 RTDS 的配套软件 RSCAD 中, RTDS 输出的电网电压、并网电流通过 GTAO 板卡转化为模拟信号送至主控制器。主控制器执行相关算法生成脉冲宽度调制信号, 该信号通过 GTDI 板卡回送至主电路完成对并网变流器的控制。主控制器采用 DSP+FPGA 架构, 主处理器采用 TI 公司的 TMS-320F28335, 协处理器采用 Xilinx 公司的 XC3S200-AN, 二者分工协作, 实现对变流器的控制。由于上述 HIL 平台包含了实际的硬件控制器, 并且兼具 RTDS 的实时仿真特性, 其仿真结果贴合实际工况, 具有较高的参考价值。VSG 的电气以及控制参数同第 3 节。



图 10 基于 RTDS 的 HIL 实时仿真平台架构

Fig.10 Structure of HIL real-time simulation platform based on RTDS

a. 工况 1: $H = 6.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s}$, $D_p = 1140 \text{ N} \cdot \text{m}$; $K = 5 \text{ A} \cdot \text{s}$, $D_0 = 150 \text{ A}$; 在 0~3 s 电网线路电感 $L_g = 2.3 \text{ mH}$, 3 s 时 L_g 变为 15.4 mH 。图 11 为 VSG 并网电压、电流的 HIL 仿真波形。

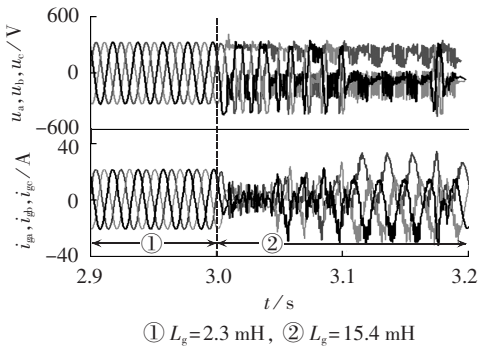


图 11 电网变弱时 VSG 的 HIL 仿真波形
Fig.11 HIL simulative waveforms of VSG with weakened grid

从工况 1 的仿真结果可以看出,VSG 在强电网环境中可稳定运行;随着线路电感 L_g 增大,并网点电压、电流发生畸变,该 HIL 仿真结果与图 7 所示结论一致,验证了分析的正确性。

b. 工况 2: 电网线路电感 $L_g=15.4$ mH; $K=5$ A·s, $D_Q=150$ A; 3 s 时有功环控制参数 H 由 12.8 kg·m²·rad/s 变为 6.4 kg·m²·rad/s, 虚拟阻尼系数 D_p 由 2280 N·m 变为 1140 N·m。图 12 为 VSG 并网点电压、电流的 HIL 仿真波形。

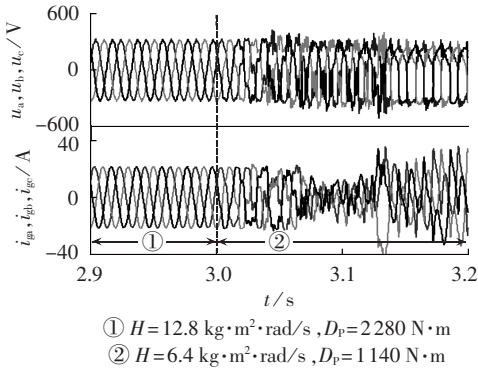


图 12 有功环控制参数减小时 VSG 的 HIL 仿真波形
Fig.12 HIL simulative waveforms of VSG with decreased active loop parameters

从工况 2 的仿真结果可以看出,弱电网环境下 VSG 在有功环控制参数较大时可稳定运行;随着有功环控制参数减小,并网点电压、电流发生畸变,该 HIL 仿真结果与图 8 所示结论一致,验证了分析的正确性。

c. 工况 3: 电网线路电感 $L_g=15.4$ mH; 参数 $H=6.4$ kg·m²·rad/s, $D_p=1140$ N·m; 在 3 s 时无功环控制参数 K 由 5 A·s 变为 10 A·s, 无功-电压下垂系数 D_Q 由 150 A 变为 300 A。图 13 为 VSG 并网点电压、电流的 HIL 仿真波形。

从工况 3 的仿真结果可以看出,弱电网环境下 VSG 无功环控制参数的增大,并未使其由失稳状态变为稳定状态,该 HIL 仿真结果与图 9 所示结论一致,验证了分析的正确性。

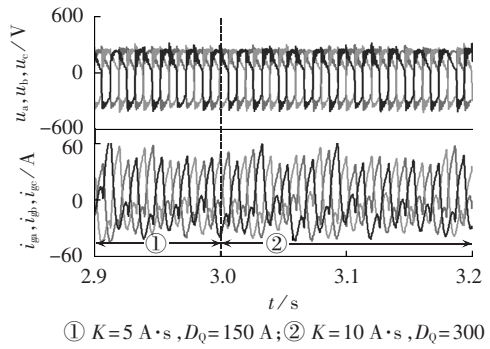


图 13 无功环控制参数增大时 VSG 的 HIL 仿真波形
Fig.13 HIL simulative waveforms of VSG with increased reactive loop parameters

6 结论

本文探讨了 VSG 在弱电网条件下的运行稳定性,提出了一种 dq 旋转坐标下 VSG 的输出阻抗模型。根据广义奈奎斯特判据,在分析电网强度、功率环控制参数对 VSG 运行稳定性影响的基础上,提出一种通过增大有功环控制参数提高 VSG 弱电网适应性的方法。最后在基于 RTDS 的 HIL 仿真平台上进行验证,得到的结论具体如下。

a. VSG 控制下的并网逆变器,其输出阻抗 $q-q$ 轴分量 Z_{qq} 在低频段呈现负电阻特性。弱电网环境下 VSG 易出现失稳现象,且电网越弱稳定裕度越低。

b. 增大有功环控制参数 H 和 D_p ,VSG 在弱电网环境下的稳定裕度提高。

c. 改变无功环控制参数 K 和 D_Q ,VSG 在弱电网环境下的稳定裕度变化较小。

因此,适当增大有功环控制参数,可提高 VSG 在弱电网中的适应性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 任敬国,李可军,牛林,等. 基于附加信号的 VSC-HVDC 系统改进有功功率控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):46-51.
REN Jingguo,LI Kejun,NIU Lin,et al. Advanced active power control strategy based on additional signal for VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):46-51.
- [3] 李超,王洪涛,韦仲康,等. 含大型风电场的弱同步电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):96-103.
LI Chao,WANG Hongtao,WEI Zhongkang,et al. Coordinated control of weakly-synchronized grid containing large wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):96-103.
- [4] ALIPOOR J,MIURA Y,ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver,CO,USA:IEEE,2013:4546-4552.

- [5] 雷一,赵争鸣,鲁思兆. LCL滤波的光伏并网逆变器有源阻尼与无源阻尼混合控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):23-27,45.
LEI Yi,ZHAO Zhengming,LU Sizhao. Hybrid control of active and passive damping for grid-connected PV inverter with LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):23-27,45.
- [6] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]//2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: 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] 孟建辉,王毅,石新春,等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报,2014,29(12):1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [9] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [10] 关雅娟,郭伟扬,郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报,2011,31(33):52-60.
GUAN Yajuan, WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. Control strategy for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.
- [11] 刘芳,张兴,石荣亮,等. 大功率微网逆变器输出阻抗解耦控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(15):117-125.
LIU Fang, ZHANG Xing, SHI Rongliang, et al. An output impedance decoupled control strategy for high power microgrid inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 117-125.
- [12] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Small-signal modelling and parametric sensitivity of a Virtual Synchronous Machine [C]//Power Systems Computation Conference. Wroclaw, Poland: IEEE, 2014: 1-9.
- [13] 吴恒,阮新波,杨东升,等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6508-6518.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [14] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [15] LIU F, LIU J, ZHANG H, et al. Stability issues of type cascade system in Hybrid Energy Storage System (HESS)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5846-5859.
- [16] FENG X, LIU J, LEE F C. Impedance specifications for stable DC distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 157-162.
- [17] HITI S, VLATKOVIC V, BOROJEVIĆ D, et al. A new control algorithm for three-phase PWM buck rectifier with input displacement factor compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(2): 173-180.
- [18] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of DQ small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [19] ETXEGARAI A, EGUIA P, TORRES E, et al. Impact of wind power in isolated power systems[C]//2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Yasmine Hammamet, Tunisia: IEEE, 2012: 63-66.
- [20] 刘桂花,曹小娇,王卫. 弱电网下单相光伏并网逆变器锁频同步方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):5022-5029.
LIU Guihua, CAO Xiaojiao, WANG Wei. A frequency locked loop grid synchronization method of single-phase grid-connected PV inverter under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 5022-5029.
- [21] BURGOS R, BOROYEVICH D, WANG F, et al. On the AC stability of high power factor three-phase rectifiers [C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 2047-2054.

作者简介:



韩刚

韩刚(1985—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为风力发电及其优化控制技术(E-mail:henryhangang@163.com);

蔡旭(1964—),男,江苏徐州人,教授,博士,主要研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制。

Output impedance modeling of virtual synchronous generator and its adaptability study in a weak grid

HAN Gang, CAI Xu

(Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The interaction stability of the virtual synchronous generator integrated power network in weak grid conditions is studied. Based on the influence of main circuit parameters and control parameters, the output impedance model of virtual synchronous generator in dq rotating coordinate system is established and its analytical expression is derived. The frequency characteristic of the output impedance is analyzed, obtaining the conclusion that the virtual synchronous generator is easy to be unstable in a weak grid. Based on the generalized Nyquist criterion, the influences of grid strengths and power loop control parameters on the stability of virtual synchronous generator are studied, based on which a method of stabilization control for virtual synchronous generators based on increasing active loop parameters is proposed to improve the adaptability of virtual synchronous generators in a weak grid. Simulation in the RTDS-based hardware-in-loop simulation platform verifies the correctness of the theoretical analysis.

Key words: virtual synchronous generator; weak grid; impedance modeling; interaction stability