

引用格式: 乔宇峰, 王鹏飞, 杨扬, 等. 具有虚拟同步机控制的大规模风电并网系统稳定性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 173-179.

Citation: QIAO Yufeng, WANG Pengfei, YANG Yang, et al. Stability evaluation of large-scale grid-connected wind farm systems with virtual synchronous generator control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 173-179.

具有虚拟同步机控制的大规模风电并网系统稳定性评估

乔宇峰, 王鹏飞, 杨扬, 张钰, 牧仁, 潘功银

(内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电分公司, 内蒙古自治区 包头 014030)

摘要: 采用虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术模拟同步发电机的外部特性, 能够为电力系统提供一定的阻尼和惯性。然而, 基于VSG控制技术的风力发电机(wind turbine generator, WTG)容易引起电力系统的低频振荡, 为此, 研究基于VSG控制的风电场并网系统的小信号稳定性。首先, 建立单个和多个基于VSG控制的风力发电机、风电场并网系统的小信号模型; 随后, 通过求解状态矩阵得到系统的特征值, 并分析系统的振荡模式; 最后, 根据特征值法进行虚拟惯量、虚拟阻尼以及线路连接电抗等参数变化对系统小信号稳定性的影响分析。

关键词: 虚拟同步机; 风力发电机; 小信号模型; 虚拟惯量; 虚拟阻尼

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.018 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2025)01-0173-07

Stability evaluation of large-scale grid-connected wind farm systems with virtual synchronous generator control

QIAO Yufeng, WANG Pengfei, YANG Yang, ZHANG Yu, MU Ren, PAN Gongyin

(Baotou Power Supply Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Baotou 014030, China)

Abstract: Using a virtual synchronous generator (VSG) control technique to simulate the external characteristics of the synchronous generator can provide certain damping and inertia for the power system. However, wind turbine generator (WTG) based on VSG control can easily cause low-frequency oscillation of the power system. In this paper, the small-signal stability of grid-connected wind farm systems based on VSG control is studied. Firstly, a single-small signal model is developed for both single and multiple VSG control-based wind turbine and grid-connected wind farm systems. Then, the system's eigenvalues are obtained by solving the state matrix, and the system's oscillation modes are analyzed. Finally, the effects of varying key parameters on the small-signal stability, such as virtual inertia, virtual damping, and line connection reactance, are analyzed using the eigenvalue method.

Key words: virtual synchronous generator; wind turbine generator; small-signal model; virtual inertia; virtual damping

随着新能源的快速发展, 越来越多的新能源机组通过逆变器接入电力系统, 电力电子设备在电力系统中的比重迅速增加^[1], 电网的运行方式和动态特性逐渐发生变化^[2-5]。然而, 当一个电力系统中同步发电机(synchronous generator, SG)较少、电力电

子设备较多时, 系统就不能提供足够的阻尼和惯性, 这将不利于电力系统的稳定运行^[6]。

为了解决上述问题, 有学者提出了虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术^[7], VSG考虑SG的机电和励磁暂态特性, 提供虚拟阻

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-07-24

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(BT2023000859)

通信作者: 乔宇峰(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网继电保护专业技术研究; E-mail: jghnzz@sina.com

尼和惯性^[6]。然而,VSG虽然模拟了SG的优良调节特性,但相应引起低频振荡问题^[8-10],因此,基于VSG的风力发电机(wind turbine generator, WTG)并网系统稳定性还需进一步分析。

在基于VSG的单台风力发电机并网系统稳定性研究中,文献[11]基于双机试验台分析了VSG取代SG后的低频振荡现象、低频振荡特点以及主要振荡模式,评估了VSG电网中电力系统稳定器对系统稳定性的作用;文献[12-13]将逆变器内部电压作为参数而不是状态变量,并将电压变化引入近似Lyapunov直接法,分析了无功电压控制环节和不同参数对VSG稳定性的影响,指出无功控制回路会降低VSG功角的稳定裕度;文献[14]提出虚拟共耦合点和虚拟功角的概念来表示带虚拟阻尼的数学模型,并分析了VSG的暂态稳定性;文献[15]基于VSG-SG互联系统的小信号模型提出了适合研究电网低频振荡的阻尼方法,通过该模型比较了VSG和SG对电力系统稳定性的影响,揭示了VSG对阻尼特性影响的机理;文献[16]建立了电压、电流双闭环有功无功控制的VSG小信号模型,研究了VSG振荡特性,分析表明,无功回路和 dq 轴电压控制对低频振荡的阻尼有很大影响。

在基于VSG的多台风力发电机并联系统稳定性研究中,文献[17]基于VSG的有源工频环路等效为 P/ω “导纳”双端网络模型,分析了影响VSG输出功率的3种因素,以及3种因素在参数变化时的工频振荡特性;文献[18-19]将SG电压相角相对于惯性中心角的偏差定义为评价多VSG微电网稳定性的工具,并通过粒子群优化算法对VSG机组参数进行优化;文献[20]研究了一种提高多VSG电网暂态稳定性的新方法,该方法在短路时抑制VSG与电网惯性频率中心之间的振荡;文献[21]提出了一种完全分散的互阻尼方法来解决多个VSGs并联时的功率振荡问题,通过引入局部功率的导数间接得到各角频率之间的差值,有效地抑制了功率振荡;文献[22-23]提出了一种用于低带宽通信的分布式VSG的二次频率控制,在不改变VSG提供虚惯量的情况下,抑制振荡使频率恢复到额定值。

综上所述,基于VSG的风力发电机并网系统稳定性理论逐渐成熟。但现有文献并未讨论VSG各参数的变化会影响基于VSG的风力发电机并网后对电力系统的低频振荡模式,以及振荡模式变化的主导因素。此外,目前对VSG控制的稳定性研究多采用阻尼转矩分析方法,该方法虽易于建立复杂的

全系统模型,但其稳定性判据较为复杂,参数区域难以识别^[24]。小信号稳定性分析中的特征值分析方法能较好地分析参数变化时系统的稳定性。因此,基于小信号模型分析方法,本文对基于VSG的风力发电机并网系统稳定性进行深入研究,通过系统特征值轨迹,进行VSG控制参数对基于VSG的单个、多个风力发电机并网系统小信号稳定性的影响分析。首先,采用VSG控制策略建立单台、多台风力发电机并网系统的小信号模型;在基于VSG的单台风力发电机并网系统小信号稳定性分析中,探讨控制参数如何影响系统的主导振荡模式,揭示控制参数调整对系统稳定性的关键作用;随后,基于VSG的多台风力发电机并网系统,详细分析虚拟惯量和虚拟阻尼如何调节系统的主导振荡模式,从理论上增强系统的阻尼特性;最后,通过非线性仿真验证相应结论。

1 基于VSG控制的风力发电机小信号模型

1.1 基于VSG的风力发电机并网结构

基于VSG的风力发电机并网结构如图1所示,其中, P_m 、 P_w 分别为永磁同步机的输出有功和流经网侧换流器的有功功率; V_c 、 θ_c 分别为网侧换流器交流侧电压、相角; I_d 、 I_q 分别为网侧换流器输出电流 d 、 q 轴上的分量; V_d 、 V_q 分别为WTG并网电压 d 、 q 轴上的分量; C 、 V_{dc} 分别为机、网侧换流器之间的直流电容、电压; X_f 为出口滤波电抗。具体可分为3个部分:①机侧换流器(machine side converter, MSC)及其控制系统;②网侧换流器(grid side converter, GSC)及其控制系统;③VSG控制系统。分析系统的稳定性时均忽略MSC及其控制系统。

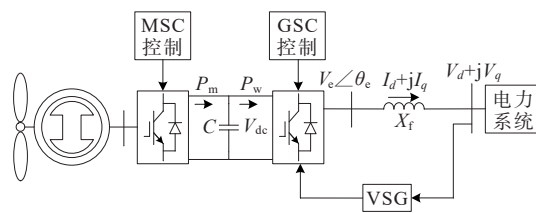


图1 基于VSG的风力发电机并网结构

Figure 1 Structure of VSG-based grid-connected WTG

1.2 VSG控制系统的小信号模型

VSG控制系统如图2^[25]所示,其中, P_e 、 P_e^{ref} 分别为风力发电机的输出、参考有功功率; Q_e 、 Q_e^{ref} 分别为风力发电机的输出、参考无功功率; H 为VSG的虚拟惯量, D 为VSG的虚拟阻尼, s 为拉普拉斯

算子, $\tilde{\theta}_e$ 为 VSG 相角控制的输出; ω_p 为 WTG 的虚拟角速度, ω_0 为同步转速; K_Q 为 VSG 无功功率控制器的增益。由图 2 可得 VSG 控制的动态方程^[26]为

$$\begin{cases} \frac{d\omega_p}{dt} = \frac{1}{2H} [P_e^{\text{ref}} - P_e - D(\omega_p - \omega_0)] \\ \frac{d\theta_e}{dt} = \omega_p \\ \frac{dV_e}{dt} = K_Q(Q_e^{\text{ref}} - Q_e) \end{cases} \quad (1)$$

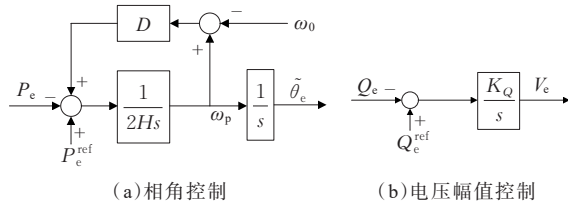


图2 VSG 控制系统

Figure 2 VSG control system

1.3 GSC 及其控制系统

GSC 及其控制系统如图 3 所示,分为直流电压外环控制和电流内环控制。其中, V_{dc}^{ref} 、 V_{dc} 分别为电容 C 处的参考、实际直流电压; K_{pv} 、 K_{iv} 分别为直流电压控制外环的比例、积分系数; x_v 为直流电压控制外环积分控制的输出; I_d^{ref} 、 I_d 分别为 d 轴电流控制内环的参考、实际电流; K_{pd} 、 K_{id} 分别为 dq 电流控制中控制外环的比例、积分系数; V_{ed}^{ref} 、 V_{eq}^{ref} 分别为网侧换流器交流侧输出电压 d 、 q 轴的参考电压; K_{pq} 、 K_{iq} 分别为 dq 电流控制中控制外环的比例、积分系数。

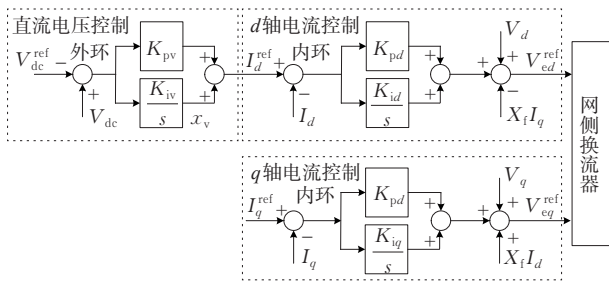


图3 GSC 及其控制系统

Figure 3 GSC and its control system

在分析风电并网系统小信号稳定性时,通常忽略 MSC,有 $\Delta P_m = 0$, 直流线路模型动态方程为

$$\begin{cases} CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_m - P_e \\ P_e = V_d I_d + V_q I_q \end{cases} \quad (2)$$

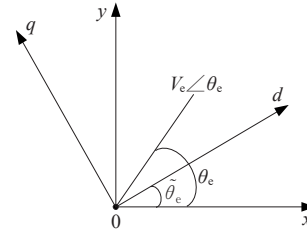
GSC 的动态方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_v}{dt} = K_{iv}(V_{dc} - V_{dc}^{\text{ref}}) \\ \frac{dx_{id}}{dt} = K_{id}(I_d^{\text{ref}} - I_d) \\ \frac{dx_{iq}}{dt} = K_{iq}(I_q^{\text{ref}} - I_q) \end{cases} \quad (3)$$

图 3 中电压、电流的参考值分别为

$$\begin{cases} \Delta I_d^{\text{ref}} = K_{pv}(\Delta V_{dc} - \Delta V_{dc}^{\text{ref}}) + \Delta x_v \\ \Delta V_{ed}^{\text{ref}} = K_{pd}(\Delta I_d^{\text{ref}} - \Delta I_d) - x_{id} + \Delta V_d - X_t \Delta I_q \\ \Delta V_{eq}^{\text{ref}} = K_{pq}(\Delta I_q^{\text{ref}} - \Delta I_q) - x_{iq} + \Delta V_q - X_t \Delta I_d \end{cases} \quad (4)$$

xy 与 dq 坐标系之间的关系如图 4 所示。

图4 风机并网点 xy 与 dq 的转换关系Figure 4 Relationship between xy and dq of a grid-connected WTG

本文分析中忽略 GSC 的快速脉冲宽度调制 (pulse-width modulation, PWM) 瞬态, 可得 $\tilde{\theta}_e = \theta_e$ 、 $\tilde{V}_e = V_e$ 。这意味着风机的输出是一个可控电压源, $V_e \angle \theta_e$, 类似于 SG 内部电动势。因此可得:

$$\begin{cases} V_{ex} = V_e \cos \theta_e \\ V_{ey} = V_e \sin \theta_e \\ P_e = V_{ex} I_{ex} + V_{ey} I_{ey} \\ Q_e = V_{ey} I_{ex} - V_{ex} I_{ey} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $I_{ex} + jI_{ey}$ 、 $V_{ex} + jV_{ey}$ 分别为 xy 坐标系下风机并网点的输出电流和端电压。

将式(1)~(5)线性化可得基于 VSG 的风力发电机线性化模型为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_e}{dt} = A_e \Delta X_e + B_e \Delta V_{ery} \\ \Delta I_{ery} = C_e \Delta X_e \end{cases} \quad (6)$$

式中, X_e 为基于 VSG 的风力发电机的状态变量 (Δ 表示对应变量的微小变化); A_e 、 B_e 和 C_e 分别为基于 VSG 的风力发电机的状态、输入和输出矩阵; $\Delta V_{ery} = \Delta V_{ex} + jV_{ey}$ 、 $\Delta I_{ery} = \Delta I_{ex} + jI_{ey}$ 。

1.4 风电场线性化模型

含有 N 台 WTG 并网系统结构如图 5 所示。由式(7)可知, 第 k 台 WTG 状态空间模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_k}{dt} = A_k \Delta X_k + B_k \Delta V_k \\ \Delta I_k = C_k \Delta X_k, k=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

式中, A_k, B_k, C_k 为第 k 台 WTG 的状态、输入和输出矩阵。

整个风电场的线性化模型为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_E}{dt} = \text{diag}[A_e] \Delta X_E + \text{diag}[B_e] \Delta V_E \\ \Delta I_E = \text{diag}[C_e] \Delta X_E \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\text{diag}()$ 表示矩阵对角化; $\Delta X_E = [\Delta X_1^T \Delta X_2^T \dots \Delta X_N^T]$, $\Delta V_E = [\Delta V_1^T \Delta V_2^T \dots \Delta V_N^T]$, $\Delta I_E = [\Delta I_1^T \Delta I_2^T \dots \Delta I_N^T]$ 。

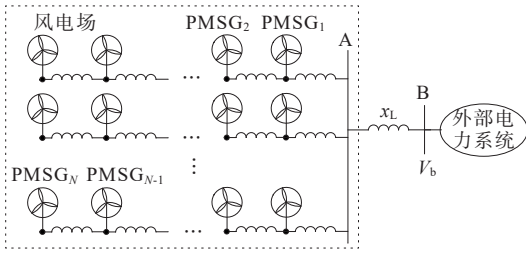


图5 风电场并网系统结构

Figure 5 Structure of grid-connected wind farm system

根据图5风电场并网系统结构,忽略线路上的电阻,并考虑风电场内部网络线路的动态,可以得到风电场网络结构线性化模型为

$$\Delta V_e = (X_{E_1} + X_{E_2}) \Delta I + \Delta V \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_{E_1} = X \otimes E_1 \\ X_{E_2} = X \otimes \frac{s}{\omega_0} E_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $E_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $E_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; \otimes 表示克罗内克

乘积; X 为风电场的电抗矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} + x_L & x_{12} + x_L & \dots & x_{1N} + x_L \\ x_{21} + x_L & x_{22} + x_L & \dots & x_{2N} + x_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} + x_L & x_{N2} + x_L & \dots & x_{NN} + x_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, x_{ij} 为第 i, j 台风机的公共电抗,加上输出线路电抗 x_L ,从而形成风电场的电抗矩阵。

将式(9)代入式(8)中,通过节点 B 的电压电流与外部电力系统形成动态交互关系:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_E}{dt} = A_E \Delta X_E + B_E \Delta V_b \\ \Delta I_c = C_E \Delta X_E \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} A_E &= (I - \text{diag}[B_e] X_{E_2} \text{diag}[C_e])^{-1} \cdot \\ & \quad (\text{diag}[A_e] + \text{diag}[B_e] X_{E_1} \text{diag}[C_e]) \\ B_E &= [B_1^T \ B_2^T \ \dots \ B_N^T]^T \\ C_E &= [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_N] \end{aligned}$$

2 基于VSG的单台风力发电机并网系统稳定性分析

2.1 系统的特征值分析

基于VSG的单台风力发电机的并网系统结构如图6所示,线路连接电抗 x_L 为0.08,其控制参数如表1所示。同时,根据式(12)中基于VSG的单个风力发电机并网系统线性化状态空间模型计算得到系统的所有特征值^[27]。系统的主导特征值计算结果如表2所示,可知主导特征值位于复平面的左半平面,表明系统是稳定的。

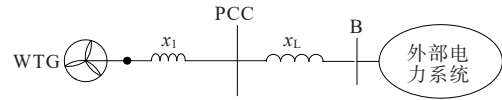


图6 单机并网系统结构

Figure 6 Structure of single grid-connected system

表1 基于VSG的单机并网系统参数

Table 1 Parameters of single grid-connected system based on VSG

P_{ref}	K_{pv}	K_{id}	C	H	Q_{ref}	K_{iv}	K_{iq}	K_Q	D
1	2	0.6	60	5	0	300	40	0.5	0.4

表2 基于VSG的单机并网系统特征值

Table 2 Eigenvalue of single grid-connected system based on VSG

特征值	实部	虚部	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	-0.015	± 58.02	9.23	0.000 26

2.2 虚拟惯量和虚拟阻尼对特征值的影响

分析虚拟惯量 H 和虚拟阻尼 D 变化时单机并网系统的特征值轨迹。当 H 从2变化到15时,其他参数保持不变,系统主导振荡模式的变化趋势如图7(a)所示,可以看出,随着 H 增大,主导振荡模式向右移动,振荡频率变小,系统稳定性变差;当 D 从0.01变化到3.01时,系统主导振荡模式的变化趋势如图7(b)所示,可以看出,随着 D 增大,主导振荡模式向复平面左侧移动,远离虚轴,振荡频率保持不变,系统稳定性得到改善。

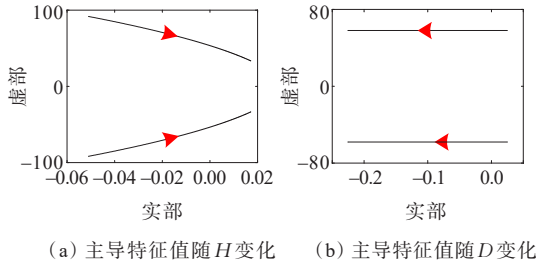


图 7 主导特征值随虚拟惯量 H 和虚拟阻尼 D 变化趋势
 Figure 7 Variation of dominant eigenvalue with virtual inertia H and virtual damping D

3 基于 VSG 的多台风力发电机并网系统稳定性分析

3.1 系统的特征值分析

为分析基于 VSG 的多台风力发电机并网系统的稳定性,以并联 20 台 WTG 为例。线路连接电抗 x_L 为 0.06,具体系统结构如图 8 所示;系统参数如表 3 所示。分析时本文假设系统中每台风力发电机的参数一致,因此,算例中只给出一台风力发电机的控制参数。

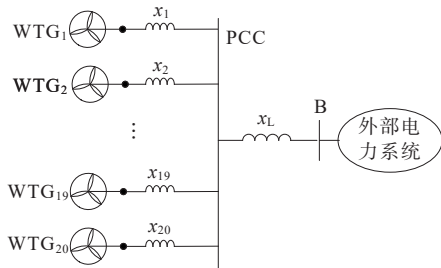


图 8 基于 VSG 的多机并网系统
 Figure 8 Multiple grid-connected system based on VSG

表 3 基于 VSG 的单台风力发电机参数

Table 3 Parameters of single WTG based on VSG

P_{ref}	K_{pv}	K_{id}	C	H	Q_{ref}	K_{iv}	K_{iq}	K_Q	D
0.3	2	0.6	60	2.5	0	300	40	1	1

通过特征值计算可得系统的主导振荡模式如表 4 所示,可知多机系统的主导特征值位于复平面的左半平面,表明系统是稳定的。

表 4 基于 VSG 的多机并网系统特征值

Table 4 Eigenvalue of multiple grid-connected system based on VSG

特征值	实部	虚部	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	-0.082	± 83.16	13.26	0.001

3.2 虚拟惯量和虚拟阻尼对特征值的影响

分析虚拟惯量 H 和虚拟阻尼 D 变化时多机并

网系统的特征值轨迹。在多机并网系统中,当每台风力发电机的 H 从 1 变化到 15 时,其他参数保持不变,系统主导振荡模式的变化趋势如图 9(a) 所示,可以看出,随着 H 增大,主导振荡模式向右移动,振荡频率变小,系统稳定性变差;当 D 从 0.01 变化到 5.01 时,系统主导振荡模式的变化趋势如图 9(b) 所示,可以看出,随着 D 增大,主导振荡模式向复平面左侧移动,远离虚轴,振荡频率保持不变,系统稳定性得到改善。为了验证特征值计算结果的正确性,对系统进行非线性仿真验证,仿真结果如图 10 所示。

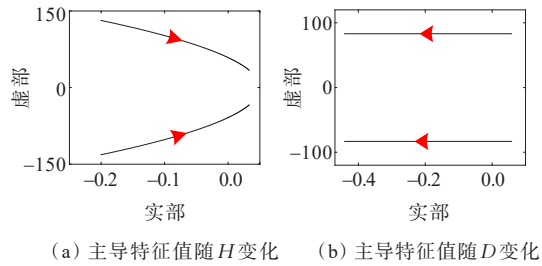
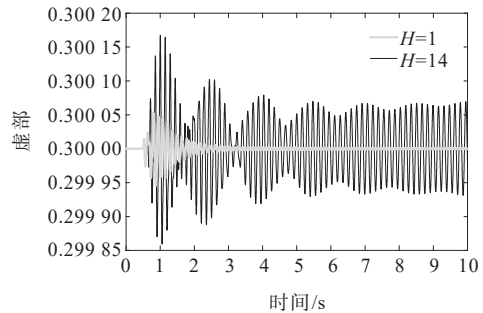
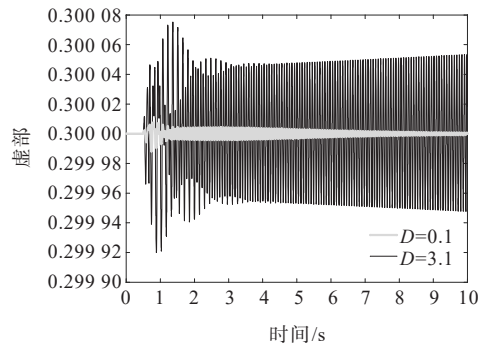


图 9 主导特征值随虚拟惯量 H 和虚拟阻尼 D 变化趋势
 Figure 9 Variation of dominant eigenvalue with virtual inertia H and virtual damping D



(a) H 不同时的非线性仿真



(b) D 不同时的非线性仿真

图 10 非线性仿真结果

Figure 10 Results of non-linear simulation

3.3 线路连接电抗对特征值的影响

线路连接电抗 x_L 在 0.01~0.20 变化时,系统的

主导特征值计算结果如表 5 所示,可以看出,随着 x_L 增加,系统主导特征值向复平面左边移动,振荡频率降低,系统稳定性变好;非线性仿真结果如图 11 所示。

表 5 线路连接电抗变化时系统主导特征值的计算结果

Table 5 Calculation result of system's dominant eigenvalue with varying line connection reactance

x_L	主导特征值	x_L	主导特征值
0.20	$-0.31 \pm j61.82$	0.05	$0.01 \pm j86.19$
0.16	$-0.24 \pm j69.94$	0.01	$0.16 \pm j95.54$
0.12	$-0.18 \pm j76.38$		

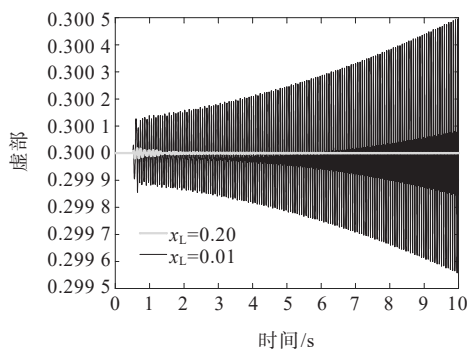


图 11 非线性仿真结果

Figure 11 Results of non-linear simulation

4 结语

本文研究了基于 VSG 的单台、多台风力发电机并网系统的稳定性。通过小信号模型、特征值计算以及非线性仿真验证了各参数对系统稳定性的影响。

1) 在基于 VSG 的单台风力发电机并网系统中,增加虚拟惯量会使系统的主导振荡模式向复平面的实轴方向移动,从而导致系统小信号稳定性变差;而增加虚拟阻尼则会使主导振荡模式向复平面的左侧移动,远离虚轴,从而提高系统的小信号稳定性。

2) 与基于 VSG 的单台风力发电机并网系统类似,在基于 VSG 的多台风力发电机并网系统中,增大虚拟阻尼将有助于提升系统稳定性;增大虚拟转动惯量不利于系统的稳定性。同时,增大线路连接电抗系统稳定性得到提升,表明基于 VSG 的风电并网系统在弱连接下稳定性较好,在强连接情况下系统更容易失稳。

参考文献:

[1] DU W, FU Q, WANG H. Damping torque analysis of DC

Voltage stability of an MTDC network for the wind power delivery[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 324-338.

[2] 罗澍忻, 韩应生, 余浩, 等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 39-48.

LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39-48.

[3] 和萍, 文福拴, 薛禹胜, 等. 风力发电对电力系统小干扰稳定性影响述评[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(1): 1-7+38.

HE Ping, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Survey on impact of wind power on small signal stability in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 26(1): 1-7+38.

[4] 刘泽健, 杨苹, 林旭, 等. 基于海上风力发电机组中虚拟飞轮储能系统的频率支撑协调控制策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 101-107.

LIU Zejian, YANG Ping, LIN Xu, et al. Coordination control strategy for frequency support based on virtual flywheel energy storage system in offshore wind turbines[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 101-107.

[5] 田涵雷, 韩沛松, 唐嵩峰, 等. 计及轻量化设计的多电平光伏逆变器[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4301-4311.

TIAN Hanlei, HAN Peisong, TANG Songfeng, et al. Multi-level photovoltaic inverter considering lightweight design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4301-4311.

[6] ZARIFAKIS M, COFFEY W T, KALMYKOV Y P, et al. Active damping of power oscillations following frequency changes in low inertia power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4984-4992.

[7] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]// 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, 2007.

[8] 康思伟, 董文凯, 郭诗然, 等. 基于虚拟同步机控制的新能源发电并网系统小干扰稳定临界短路比[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 131-140.

KANG Siwei, DONG Wenkai, GUO Shiran, et al. Critical short-circuit ratio of small-signal stability for a grid-connected renewable power generation system based on virtual synchronous generator control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 131-140.

[9] RASHID M H, KUMAR N, KULKARNI A R. Power electronics: devices, circuits, and applications (4th Edition) [M]. Edinburgh Gate Harlow, England, UK: Pearson Education Ltd., 2014: 154-156.

[10] 刘秦娥, 任东风, 康逸群, 等. 基于阻尼功率调整的虚拟同

- 步机有功功率控制方法[J].智慧电力,2024,52(3):63-70.
- LIU Qin'e, REN Dongfeng, KANG Yiqun, et al. Active power control method of virtual synchronous generator based on damping power adjustment[J]. Smart Power, 2024,52(3):63-70.
- [11] 付强,杜文娟,王海风.多虚拟同步发电机接入对电力系统机电振荡模式的影响[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5615-5624.
- FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Influence of multi virtual synchronous generators on power system electromechanical oscillation mode[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(19):5615-5624.
- [12] 王继磊,张兴,朱乔华,等.虚拟同步发电机暂态稳定性分析与控制策略[J].电机与控制学报,2022,26(12):28-37.
- WANG Jilei, ZHANG Xing, ZHU Qiaohua, et al. Transient stability analysis and control strategy of virtual synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2022,26(12):28-37.
- [13] 杨师旋,崔双喜.采用虚拟同步发电机技术的智能建筑辅助调频[J].电力建设,2024,45(6):130-139.
- YANG Shixuan, CUI Shuangxi. Auxiliary frequency regulation for intelligent buildings using virtual synchronous generator technology[J]. Electric Power Construction,2024,45(6):130-139.
- [14] XIONG X, WU C, BLAABJERG F. Effects of virtual resistance on transient stability of virtual synchronous generators under grid voltage sag[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2022,69(5):4754-4764.
- [15] 孙大卫,刘辉,吴林林,等.虚拟同步发电机对低频振荡的影响建模与特性分析[J].电力系统自动化,2020,44(24):134-144.
- SUN Dawei, LIU Hui, WU Linlin, et al. Modeling and characteristic analysis on influence of virtual synchronous generator on low-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(24):134-144.
- [16] 王杨,张兴,郭梓暄,等.虚拟同步发电机次同步振荡抑制策略[J].电力电子技术,2021,55(4):20-25.
- WANG Yang, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Suppression strategy of subsynchronous oscillation virtual synchronous generator[J]. Power Electronics,2021,55(4):20-25.
- [17] QIN B, XU Y, YUAN C, et al. A unified method of frequency oscillation characteristic analysis for multi-vsg grid-connected system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2022,37(1):279-289.
- [18] 晁凯云,苗世洪,刘子文,等.基于虚拟同步电机控制的微电网稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(3):9-16.
- CHAO Kaiyun, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Stability analysis of microgrid based on virtual synchronous generator control[J]. Power System Protection and Control,2019,47(3):9-16.
- [19] 姚培煜,卢芋廷,冯国栋,等.基于非线性拟合单位电流最优输出功率的永磁同步电机位置估计误差补偿策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):13-21.
- YAO Peiyu, LU Yuting, FENG Guodong, et al. Position estimation error compensation strategy of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear fitting unit current optimal output power [J]. Power System Protection and Control,2023,51(24):13-21.
- [20] CHOOPANI M, HOSSEINIAN S H, VAHIDI H. New transient stability and LVRT improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(1):527-538.
- [21] FU S, SUN Y, LI L, et al. Power oscillation suppression of multi-VSG grid via decentralized mutual damping control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022,69(10):10202-10214.
- [22] 李斌,龚祥祥,胡丹丹,等.孤岛微电网的虚拟同步发电机分布式协同二次调频控制[J].电气工程学报,2024,19(1):334-343.
- LI Bin, GONG Xiangxiang, HU Dandan, et al. Distributed cooperative secondary frequency modulation control of virtual synchronous generator in islanded microgrid[J]. Journal of Electrical Engineering,2024,19(1):334-343.
- [23] 黄堃,付明,梁加本.基于融合专家知识DDPG的孤岛微电网频率调节策略[J].中国电力,2024,57(2):194-201.
- HUANG Kun, FU Ming, LIANG Jiaben. Frequency regulation strategy of isolated island microgrid based on fusion expert knowledge DDPG[J]. Electric Power,2024,57(2):194-201.
- [24] SHI M, CHEN X, ZHOU J, et al. Frequency restoration and oscillation damping of distributed VSGs in microgrid with low bandwidth communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(2):1011-1021.
- [25] DU W, DONG W, WANG Y, et al. Small-disturbance stability of a wind farm with virtual synchronous generators under the condition of weak grid connection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5550-5511.
- [26] 杜文娟,王海风.电力系统宽频振荡开环模式谐振原理与分析方法[M].北京:科学出版社,2019:48-55.
- DU Wenjuan, WANG Haifeng. Principle and analysis method of open-loop mode resonance of broadband oscillation in power system[M]. Beijing: Science Press, 2019:48-55.
- [27] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析理论[M].北京:科学出版社,2005:96-100.
- LIU Tianqi, QIU Xiaoyan. Power system analysis theory [M]. Beijing: Science Press, 2005:96-100.