虚拟同步发电机接入电力系统的阻尼转矩分析

马燕峰¹,郑力文¹,霍亚欣¹,林子健²,赵书强¹ (1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003; 2. 中国南方电网公司佛山供电局,广东 佛山 528000)

摘要:针对虚拟同步发电机(VSG)控制的电压源型逆变器接入交流系统,建立含VSG的单机无穷大系统的线性化模型,分析VSG控制的新能源接入对电力系统低频振荡的影响。采用阻尼转矩分析法揭示VSG接入对电力系统机电振荡模式的影响机理,并利用 DIgSILENT / PowerFactory 仿真软件进行仿真验证,结果表明: VSG 通过向系统中同步发电机的机电振荡环提供阻尼转矩改变系统的整体阻尼,进而影响电力系统的振荡稳定性。

关键词:虚拟同步发电机;单机无穷大系统;低频振荡;模态分析;阻尼转矩 中图分类号:TM 761 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202003027

0 引言

近年来,基于电力电子设备接口的可再生能源 电源在电网中的渗透率不断提高,与传统电力系统 中的同步发电机(SG)相比,其几乎不具备维持系统 稳定性的旋转惯性和阻尼,大量接入电网会影响电 力系统的稳定性[12]。因此,需要研究如何通过适当 的控制算法来改善电力系统的动态响应及稳定性。 虚拟同步发电机 VSG(Virtual Synchronous Generator)在逆变器控制中脱颖而出。它是通过模拟同步 电机的行为来支持电力系统稳定的逆变器控制方 案^[3]。依托欧洲 VSYNC 项目, 致力于利用储能系统 改善电网稳定性的控制研究,比利时鲁汶大学以及 德国克劳斯塔尔工业大学提出了电流控制型 VSG 技术方案^[45];钟庆昌教授根据SG的电磁特性制定 了一种"synchronverter"方案^[6],能够更好地体现发 电机的状态性能;文献[7]结合Hamilton理论和VSG 控制技术,设计了保留系统非线性的四阶 VSG 模 型,使模型更加精确。众多研究团队在VSG的建 模、控制与应用等方面都开展了大量的工作,所取 得的研究成果对理解 VSG 技术具有很好的参考 价值[8-10]。

随着新能源在电网中渗透率的不断提高,VSG 自身的稳定性及其对电网稳定性的影响成为该技术 发展的关键。对VSG并网时稳定特性的掌握为该 技术的大范围推广提供了可能。目前已经有学者针 对VSG的稳定性问题开展了相关的研究。文献 [11]建立了VSG二阶模型的小信号模型,并分析了 相关参数对动态稳定性的影响;文献[12]建立了计

收稿日期:2019-07-12;修回日期:2020-01-10 基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2017502077) Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2017502077) 及内环控制器和线路、负荷动态特性的VSG单机带 负载运行的小信号模型,分析了状态变量与特征根 的关联程度以及特征根的变化对小信号稳定的影 响;文献[13]建立了应用于储能系统并网逆变器的 VSG动态小信号模型,分析其参与电网需求响应的 机理;文献[14]建立了VSG并联的小信号模型并提 出虚拟阻抗匹配策略;由于SG与VSG在数学模型上 的一致性,文献[15]将阻尼转矩理论应用于VSG的 有功环节分析,得到转动惯量主要影响振荡模式的 频率和阻尼系数主要决定振荡模式衰减速度的结 论;文献[16]通过Phillips-Heffron模型分析了多VSG 接入对交流系统机电振荡模式的影响机理,文献 [17]讨论了无功电压环节对VSG稳定性的影响,但 文献[16-17]未考虑不同的VSG渗透率对系统造成 的影响。

以上针对VSG并网稳定性的研究大多是建立 在小信号模型的基础上,通过仿真分析控制参数和 电网参数对系统的影响。在VSG发展初期,其容量 与传统机组相比几乎可以忽略不计,因此电力系统 的稳定性几乎不会受到VSG的影响。但随着VSG 技术的不断发展,有必要研究不同的VSG渗透率下 系统的稳定性。

本文研究 VSG 接入对系统机电振荡模式的影响机理。首先,建立含 VSG 的单机无穷大系统模型;然后,基于阻尼转矩分析方法,从机理上分析 VSG 向系统中其他发电机提供的阻尼转矩;最后,通 过综合计算和仿真结果分析 VSG 对电力系统的振 荡稳定性的影响机理和因素。

1 含VSG 接入的单机无穷大系统模型

VSG 接入单机无穷大系统的结构图如图1所示,VSG 在节点w处接入系统。图中,V_b为无穷大母 线电压;V_b为VSG 输出端电压,其与单机无穷大母线

电压的夹角为 θ_1 ; V_t 为SG端电压; V_w 为节点w的电 压; X_1, X_b, X_w, X_1 分别为节点t与节点w、节点w与节 点b、节点w与节点S、VSG输出端与节点S之间的阻 抗值。



图1 VSG 接入单机无穷大系统的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of single-machine infinite-bus system connected with VSG

1.1 VSG控制子系统的开环线性化模型

VSG采用式(1)所示的二阶模型。

$$\begin{cases} \omega_{1} = (P_{ref} - P_{1})/(Js + D_{1}) \\ \delta_{1} = (\omega_{1} - \omega_{0})/s \\ V_{c1} = U_{ref} + K(Q_{ref} - Q_{1}) \end{cases}$$
(1)

其中, ω_1 为VSG等效内电势的角频率; ω_0 为电网基 准角频率; V_{e1} 为VSG内部电动势,其与无穷大母线 电压的夹角为 δ_1 ; P_{ref} 、 Q_{ref} 、 U_{ref} 分别为有功、无功、电 压设定值; J_{o} 力分别为VSG的转动惯量、阻尼系数; K为无功控制器的增益。

考虑到 VSG 与交流系统的连接线路及其节点 电压和相角,有:

$$\begin{cases} P_1 = [V_{c1}^2 \sin(2\delta_1) + V_{c1}V_s \sin(\theta_1 - \delta_1)]/X_1 \\ Q_1 = [V_{c1}V_s \cos(\theta_1 - \delta_1) - V_{c1}^2 \cos(2\delta_1)]/X_1 \end{cases}$$
(2)

对式(1)和式(2)进行线性化可得:

$$\begin{cases} s\delta_1 = \omega_0 \Delta \omega_1 \\ Js\omega_1 = -\Delta P_1 - D_1 \Delta \omega_1 \\ \Delta V_{c1} = -K\Delta Q_1 \end{cases}$$
(3)

$$\begin{cases} \Delta P_1 = K_{\text{pcl}} \Delta \delta_1 + K_{\text{pc2}} \Delta V_{\text{cl}} + K_{\text{pl}} \Delta \theta_1 + K_{\text{p2}} \Delta V_{\text{s}} \\ \Delta Q_1 = K_{\text{qcl}} \Delta \delta_1 + K_{\text{qc2}} \Delta V_{\text{cl}} + K_{\text{ql}} \Delta \theta_1 + K_{\text{q2}} \Delta V_{\text{s}} \end{cases}$$
(4)

其中, K_{pe1} 、 K_{pe2} 、 K_{p1} 、 K_{p2} 分别为 ΔP_1 对 $\Delta \delta_1$ 、 ΔV_{e1} 、 $\Delta \theta_1$ 、 ΔV_s 求偏导的系数; K_{qe1} 、 K_{qe2} 、 K_{q1} 、 K_{q2} 分别为 ΔQ_1 对 $\Delta \delta_1$ 、 ΔV_{e1} 、 $\Delta \theta_1$ 、 ΔV_s 求偏导的系数。

将式(3)代入式(4)可得:

$$\begin{cases} \Delta Q_1 = K_{q\delta_1} \Delta \delta_1 + K_{q\theta_1} \Delta \theta_1 + K_{q\theta_1} \Delta V_s \\ \Delta P_1 = K_{p\delta_1} \Delta \delta_1 + K_{p\theta_1} \Delta \theta_1 + K_{pr_1} \Delta V_s \end{cases}$$
(5)

其中, K_{qq_1} 、 K_{qq_1} 、 K_{qq_1} 分别为 ΔQ_1 对 $\Delta \delta_1$ 、 $\Delta \theta_1$ 、 ΔV_s 求偏 导的系数; $K_{p\delta_1}$ 、 K_{pq_1} 、 K_{pq_1} 分别为 ΔP_1 对 $\Delta \delta_1$ 、 $\Delta \theta_1$ 、 ΔV_s 求偏导的系数。式(4)与式(5)的区别在于 ΔQ_1 、 ΔP_1 表达式等号右侧所使用的线性化变量不同,因此系 数也不同)。

联立式(3)与式(5),可得VSG控制子系统的开

环状态空间矩阵如下:

$$\begin{cases} s\Delta X_{\rm VSG} = A_{\rm VSG}\Delta X_{\rm VSG} + b_{21}\Delta\theta_1 + b_{22}\Delta V_{\rm s} \\ \Delta P_1 = c_{\rm VSGp}^{\rm T}\Delta X_{\rm VSG} + K_{\rm p\theta_1}\Delta\theta_1 + K_{\rm pw_1}\Delta V_{\rm s} \\ \Delta Q_1 = c_{\rm VSGq}^{\rm T}\Delta X_{\rm VSG} + K_{\rm q\theta_1}\Delta\theta_1 + K_{\rm qw_1}\Delta V_{\rm s} \end{cases}$$
(6)

VSG 控制子系统的开环传递函数为: $\begin{cases} \Delta P_{1} = H_{vp}(s)\Delta V_{s} + H_{\theta p}(s)\Delta \theta_{1} \\ \Delta Q_{1} = H_{vq}(s)\Delta V_{s} + H_{\theta q}(s)\Delta \theta_{1} \end{cases}$ (7) $\begin{cases} H_{vp}(s) = c_{VSCp}^{T}(sI - A_{VSC})^{-1}b_{21} + K_{pv_{1}} \\ H_{\theta p}(s) = c_{VSCp}^{T}(sI - A_{VSC})^{-1}b_{22} + K_{p\theta_{1}} \\ H_{vq}(s) = c_{VSCq}^{T}(sI - A_{VSC})^{-1}b_{21} + K_{qv_{1}} \\ H_{\theta q}(s) = c_{VSCq}^{T}(sI - A_{VSC})^{-1}b_{21} + K_{qv_{1}} \end{cases}$ (8)

其中, A_{vsc} 为描述VSG状态空间表达式的系数矩阵; b_{21} 、 b_{22} 为描述VSG状态空间表达式的输入矩阵;I为单位矩阵,其维数与 A_{vsc} 一致。

建立以 ΔP_1 、 ΔQ_1 为输出信号,以 ΔV_s 、 $\Delta \theta_1$ 为输入信号的VSG子系统开环线性化模型。

1.2 单机无穷大系统的开环线性化模型

单机无穷大系统的简化数学模型由发电机转子运动方程、励磁绕组电压方程和自动电压调节器动态方程组成,即:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_{0} (\omega - 1) \\ \dot{\omega} = [P_{m} - P_{e} - D(\omega - 1)] / M \\ \dot{E}'_{q} = (E_{td} - E_{q}) / T'_{d0} \\ \dot{E}'_{td} = -E'_{td} / T_{A} + K_{A} (V_{ref} - V_{t}) / T_{A} \end{cases}$$
(9)

其中, E'_q 为SG的q轴暂态电动势,其与无穷大母线 电压的夹角为 $\delta;\omega$ 为SG的角速度;M为转子的惯性 常数;D为阻尼系数; P_m 、 P_e 分别为SG的机械功率、 电磁功率; T'_{a0} 为励磁绕组自身的时间常数; E_{id} 为励 磁电压; E_q 为SG的q轴电动势; V_{ref} 为电压参考值; K_A 为自动电压调节器的增益; T_A 为自动电压调节器的 时间常数。

对式(9)进行线性化可得 SG 的开环线性化模型为^[18]:

 $s\Delta X_{\rm G} = A_{\rm G}\Delta X_{\rm G} + b_{11}\Delta\theta_1 + b_{12}\Delta V_{\rm s}$ (10) 其中, $A_{\rm G}$ 为描述SG状态空间表达式的系数矩阵; b_{11} 、 b_{12} 为描述SG状态空间表达式的输入矩阵。

1.3 VSG 接入单机无穷大系统的线性化模型

根据图1中各节点电压在 dq 坐标系下的关系^[18] 可得:

$$\begin{cases} V_{td} = V_{sd} - X_{t}I_{tq} - X_{w}I_{wq} \\ V_{bd} = V_{sd} - X_{w}I_{wq} + X_{b}(I_{tq} - I_{wq}) \end{cases}$$
(11)

$$\begin{cases} V_{tq} = V_{sq} + X_{t}I_{ud} + X_{w}I_{wd} \\ V_{bd} = V_{sq} + X_{w}I_{wd} - X_{b}(I_{ud} - I_{wd}) \end{cases}$$
(12)

VSG在公共坐标系存在如下关系:

$$\begin{cases} V_{ud} = X_q I_{uq} \\ V_{uq} = E'_q - X'_d I_{ud} \end{cases}$$
(13)

SG接入单机无穷大系统的接口电气方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_{uq} \\ I_{uq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{b} \sin \delta \\ V_{s} \sin (\delta - \theta_{1}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{ud} \\ I_{ud} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s} \cos (\delta - \theta_{1}) - V_{b} \cos \delta \\ E'_{q} - V_{b} \cos \delta \end{bmatrix}$$
(14)

VSG的输出电流在 dq 坐标系和自身坐标系之间的变换关系为:

$$\begin{cases} I_{\text{vSG}d} = I_{wd} \cos\left(\delta - \delta_{1}\right) - I_{wq} \sin\left(\delta - \delta_{1}\right) \\ I_{\text{vSG}q} = I_{wd} \sin\left(\delta - \delta_{1}\right) + I_{wq} \cos\left(\delta - \delta_{1}\right) \end{cases}$$
(15)

线性化式(14)和式(15)可得:

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{VSG}d} = R_1 \Delta \delta + R_2 \Delta E'_q + R_3 \Delta \delta_1 + R_4 \Delta \theta_1 + R_5 \Delta V_s \\ \Delta I_{\text{VSG}q} = R_6 \Delta \delta + R_7 \Delta E'_q + R_8 \Delta \delta_1 + R_9 \Delta \theta_1 + R_{10} \Delta V_s \end{cases}$$
(16)

根据 VSG 输出电流的计算式,进行线性化可得:

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{VSG}d} = R_{11} \Delta V_{\text{s}} + R_{12} \Delta \delta_1 + R_{13} \Delta \theta_1 \\ \Delta I_{\text{VSG}g} = R_{14} \Delta \delta_1 \end{cases}$$
(17)

联立式(16)和式(17)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1} & b_{2} & b_{3} \\ b_{4} & b_{5} & b_{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E'_{q} \\ \Delta \delta_{1} \end{bmatrix}$$
(18)

由式(6)、(10)、(18)可得VSG接入单机无穷大 系统的线性化模型如式(19)所示。

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ u = CX \end{cases}$$
(19)
$$[\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E'_{a}, \Delta E'_{b}, \Delta\delta_{1}, \Delta\omega_{1}]^{\mathrm{T}}$$

$$X = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E'_q, \Delta E'_{id}, \Delta\delta_1, \Delta\omega_1]$$
$$u = [\Delta\theta_1, \Delta V_s]^{\mathrm{T}}$$

系统线性化模型见附录A中图A1,各矩阵的具体元素见附录B。

2 VSG对系统机电振荡模式的影响

式(19)可以写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{X}_{G} = A_{G}X_{G} + b_{11}\Delta\theta_{1} + b_{12}\Delta V_{s} \\ \dot{X}_{VSG} = A_{VSG}\Delta X_{VSG} + b_{21}\Delta\theta_{1} + b_{22}\Delta V_{s} \end{cases}$$
(20)

$$\boldsymbol{X}_{\text{VSG}} = (\boldsymbol{s}\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}_{\text{VSG}})^{-1} (\boldsymbol{b}_{21}\Delta\boldsymbol{\theta}_1 + \boldsymbol{b}_{22}\Delta\boldsymbol{V}_{\text{s}}) \quad (21)$$

VSG向SG的机电振荡环提供电磁转矩的前向 通道控制框图如附录C中图C1所示,由图可得传递 函数为:

$$\begin{cases} \Delta \theta'_1 = b_2 \Delta E'_{qq} + u_{\theta}, \ u_{\theta} = C_{12} X_{\text{VSG}} \\ \Delta V' = b_5 \Delta E' + u_{\theta}, \ u_{\theta} = C_{22} X_{\text{VSG}} \end{cases}$$
(22)

$$\begin{cases} \Delta T_e = K_2 \Delta E'_{qq} + K_{p\theta} \Delta \theta'_1 + K_{pv} \Delta V'_s \\ \Delta E'_{qq} = \frac{1}{K_3 + T'_{d0} s} \left(\Delta E'_{tdd} - K_{E\theta} \Delta \theta'_1 - K_{Ev} \Delta V'_s \right) \\ \Delta E'_{tdd} = -\frac{K_A}{1 + T_A s} \left(K_6 \Delta E'_{qq} + K_{v\theta} \Delta \theta'_1 + K_{vv} \Delta V'_s \right) \end{cases}$$
(23)

由式(23)可以得到前向通道的状态空间方 程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_{qq} \\ \Delta \dot{E}'_{idd} \end{bmatrix} = A_2 \begin{bmatrix} \Delta E'_{qq} \\ \Delta E'_{idd} \end{bmatrix} + B_2 \begin{bmatrix} u_{\theta} \\ u_{v} \end{bmatrix}$$
$$\Delta T_e = C_2 \begin{bmatrix} \Delta E'_{qq} \\ \Delta E'_{idd} \end{bmatrix} + d_2 \begin{bmatrix} u_{\theta} \\ u_{v} \end{bmatrix}$$
(24)

VSG向SG的机电振荡环提供的电磁转矩为:

$$\Delta T_{\rm e} = \left[C_2 (sI - A_2)^{-1} B_2 + d_2 \right] \begin{bmatrix} u_{\theta} \\ u_{\nu} \end{bmatrix} = F_{\omega}(s) \Delta \delta (25)$$

其中, $F_{\omega}(s)$ 为 ΔT_{e} 与 $\Delta \delta$ 之间的传递函数。

在振荡角频率 ω_{s} 下, VSG向SG提供的阻尼转 矩为:

$$\Delta T_{ed} = -\frac{\omega_0}{\omega_s} \operatorname{Im} \left[F_{\omega}(j\omega_s) \right] \Delta \omega \qquad (26)$$

其中,Δω为角频率差。

由附录C中图C1和式(23)可以看出,VSG向SG 的机电振荡回路提供的电磁转矩包括电磁转矩 $K_{p\theta}\Delta\theta'_1 + K_{pc}\Delta V'_s$ 和电磁转矩 $K_2\Delta E'_q$ 这2个部分。根 据阻尼转矩分析法,电磁转矩又可以分解为同步转 矩和阻尼转矩,VSG提供的阻尼转矩决定了其对系 统稳定性的影响。VSG的转子运动方程中 $\Delta\delta_1$ 的形 成需经过一个滞后环节向SG的机电振荡回路提供 阻尼转矩,信号会被削弱。

因为VSG外特性模拟SG具有旋转部分,接入电 力系统后会增加额外的系统机电模态,并会向系统 中SG的机电振荡环提供阻尼转矩,通过与SG发生 动态交互,进而影响电力系统的振荡稳定性。

3 算例计算

图 1 所示系统的初始运行点参数如下:①输电 线及变压器, X_1 =0.15 p.u., X_b =0.15 p.u., X_w =0.15 p.u.; ②发电机, X_d =0.8 p.u., X_q =0.4 p.u., X'_d =0.05 p.u.,M= 8 s,D=18, T_{d0} =5 s;③电压调节器(AVR), T_A =0.01 s, K_A =10;④初始运行点电压参数, V_{00} =0.15 p.u., V_{s0} =1.0 p.u., V_{b0} =1.0 p.u.;⑤VSG, X_d =0.9 p.u., X_q =5.44 p.u., X'_d =0.06 p.u.,J=8 kg·m², D_1 =20。

当SG、VSG的有功出力分别为0.6、0.4 p.u.时, 计算得系统的2个机电振荡模式分别为-1.336 3+ j8.6959、-1.2500+j4.4675,第2个机电模式是由VSG 产生的,在之后的分析中只考虑SG的振荡模式,定 义为模式1。在SG的振荡角频率为 ω_s =8.6959(机 电振荡模式的虚部)下,VSG向SG的振荡环提供的 阻尼转矩为 ΔT_{ed} = $0.1623\Delta\omega_o$ 。

表1-3给出了不同工况下VSG提供的阻尼转 矩和系统机电振荡模式的计算结果。表中,P_{sc}、P_{vsc} 分别为SG、VSG的有功出力(均为标幺值)。

由表1-3可知:当SG发出恒定功率时,VSG向

表1 SG出力不变、VSG出力变化时的计算结果

Table 1 Calculative results when output of SG is constant and output of VSG changes

$P_{\rm SG}$	$P_{\rm VSG}$	阻尼转矩系数	振荡模式
0.5	0.1	0.0025	-1.3062+j8.6694
0.5	0.2	0.0374	-1.3076+j8.6597
0.5	0.3	0.1053	-1.3090+j8.6481
0.5	0.4	0.1472	-1.3104+j8.6344
0.5	0.5	0.1862	-1.3119+j8.6189
0.5	0.6	0.2460	-1.3114+j8.6014
0.5	0.7	0.0477	-1.3149+j8.5821
0.5	0.8	0.0096	-1.3164+j8.5609
0.5	0.9	0.0020	-1.3179+j8.5378

表2 VSG出力不变、SG出力变化时的计算结果

Table 2 Calculative results when output of VSG is constant and output of SG changes

		-	-
$P_{\rm VSG}$	$P_{\rm SG}$	阻尼转矩系数	振荡模式
0.2	0.1	0.0054	-1.2528+j8.3640
0.2	0.2	0.0123	-1.261 5+j8.400 8
0.2	0.3	0.0201	-1.2757+j8.4430
0.2	0.4	0.0286	-1.294 3+j8.495 1
0.2	0.5	0.0374	-1.3164+j8.5609
0.2	0.6	0.0457	-1.3406+j8.6438
0.2	0.7	0.0527	-1.365 5+j8.746 3
0.2	0.8	0.0576	-1.3896+j8.8701

表3 VSG和SG的总功率保持不变时的计算结果

Table 3 Calculative results when total power of VSG and SG remains constant

$P_{\rm VSG}$	$P_{\rm SG}$	阻尼转矩系数	振荡模式
0.2	0.8	0.0576	-1.3896+j8.8701
0.3	0.7	0.1304	-1.3626+j8.7790
0.4	0.6	0.1623	-1.3363+j8.6959
0.5	0.5	0.1862	-1.3119+j8.6189
0.6	0.4	0.2320	-1.2903+j8.5455
0.7	0.3	0.1195	-1.2726+j8.4730
0.8	0.2	0.0305	-1.2595+j8.3984
0.9	0.1	0.0064	-1.2518+j8.3184

发电机的振荡回路提供的阻尼转矩会随着其功率的 增加先增加后减小;与VSG出力变化相比,SG出力 变化引起的机电振荡模式阻尼的变化要大很多;当 VSG和SG的总功率保持不变时,在VSG的功率逐渐 提高的过程中,其提供的阻尼转矩恒为正值且先增 大后减小。综上所述,在VSG接入的单机无穷大系 统的案例中,VSG会提供一定的正阻尼转矩,在一定 程度上提高系统的稳定性。

4 含VSG 接入的单机无穷大系统仿真

在 DIgSILENT / Powerfactory 软件中构建图 1 所示的系统,系统频率为 50 Hz,流经逆变器的交流电经 LC 滤波电路(滤波电感设为 18 mH,滤波电容设为 31 μ F)和传输线(线路电阻设为 5 Ω)与外电网相连,初始运行状态为:VSG 的输出功率为 109 MW,

SG的输出功率为300 MW。

4.1 VSG 接入单机无穷大系统的稳定性验证

在 SG 侧施加小扰动后, VSG 的频率和 SG 的功 率、频率曲线如图 2 所示(图中频率为标幺值)。



图2 系统响应曲线

Fig.2 System response curves

由图2可以看出,系统中SG的功率经过小扰动 后发生一定程度的波动但很快趋于稳定;由图2(a) 可看出SG的振荡变化比VSG的变化幅度大,恢复稳 定的时间也相对较长。

4.2 VSG 接入单机无穷大系统的模态分析

在VSG、SG的输出功率分别为109、300 MW时, 其机电振荡模式的相关结果如表4所示。

表4 系统振荡模式的相关结果

Table 4 Related results of system oscillation mod	es
---	----

模式	特征值	振荡频率 / Hz	阻尼比
1	-1.40765+j8.31448	1.32329	0.16690
2	-2.87338+j1.67046	0.265 80	0.86452

2个模式与系统各状态变量的参与因子如表5 所示。表中幅值为标幺值。由表5可看出,模式1与 SG的状态变量联系紧密。

表5 各模式参与因子的计算结果

Table 5 Calculative results of participation

factors for each modes

模式	元件	状态变量	幅值	相角 / (°)
1	SG	ω	1.000	0
1	SG	δ	0.991	176.19
2	VSG	ω_1	1.000	0
Z	VSG	δ_1	0.642	160.80

表5中的幅值表示参与因子的大小,相角表示 模式1被激发时在各个状态变量表现出的相位关 系,即右特征向量的相角。

4.3 不同工况下的振荡稳定性对比

表6—8给出了不同的工况下系统机电振荡模 式的仿真结果。 表6 SG出力不变、VSG出力变化时的仿真结果

Table 6 Calculative results when output of SG is constant and output of VSG changes

$P_{ m SG}$ / MW	$P_{\rm VSG}$ / MW	振荡模式
300	109	-1.40765+j8.31448
300	98	-1.40633+j8.31849
300	85.7	-1.40566+j8.31928
300	75.1	-1.40532+j8.31980
300	63.1	-1.40501+j8.32031
300	35	-1.404425+j8.32135

表7 VSG出力不变、SG出力变化时的仿真结果

Table 7 Calculative results when output of VSG is constant and output of SG changes

$P_{\rm VSG}$ / MW	$P_{\rm SG}$ / MW	振荡模式
109	50	-1.39942+j8.33382
109	100	-1.40107+j8.33226
109	150	-1.40278+j8.32983
109	200	-1.404 55+j8.326 52
109	250	-1.40638+j8.32233
109	300	-1.40827+j8.31726

表8 VSG和SG的总功率保持不变的仿真结果

 Table 8
 Calculative results when total power of

 VSG and SG remains constant

$P_{\rm SG}$ / MW	$P_{\rm VSG}$ / MW	振荡模式
191	109	-1.402230+j8.327180
214.3	85.7	-1.402367+j8.327440
225	75	-1.402400+j8.327090
237	63	-1.402530+j8.326580
265	35	-1.403020+j8.325023

由表6-8可得,当SG的功率不变时,VSG的功 率变化引起的系统振荡模式的变化和计算结果趋势 一致;当VSG的功率不变时,SG的功率变化引起的 振荡模式的变化较大,并随着SG功率的增加,系统 越稳定;当SG和VSG的总功率不变时,随着SG提供 的功率增加,振荡模式的实部离虚轴的距离变大,系 统稳定性增强。

5 结论

本文基于含 VSG 的单机无穷大系统的线性化 模型,采用阻尼转矩分析法分析了 VSG 接入对系统 机电振荡环的影响并进行了验证,所得主要结论 如下。

(1)VSG 接入电力系统使得系统仍具有较强的 稳定性,二者均具有抵抗小干扰的能力。

(2)VSG 控制在外特性上与 SG 等效,具有转动 惯量和阻尼,因此会增加系统的机电振荡模式;振荡 模式与转子运动方程中的状态变量 ω₁和δ₁密切 相关。

(3)VSG通过控制变量*V*_s和*θ*₁与系统连接,并向 SG的机电振荡环提供阻尼转矩,通过与SG发生动 态交互,进而影响电力系统的振荡稳定性。本文为 研究新能源接入多机系统的稳定性奠定了基础。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
 LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems,
- 2007,31(19):100-107.
 [2]陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.
 CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26-32,39.
- [3] 丁明,杨向真,苏建徽.基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(8):89-93.
 DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (8):89-93.
- [4] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine [C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain: IEEE, 2007:1-6.
- [5] VISSCHER K, DE HAAN S W H. Virtual synchronous machines(VSG's) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation[C] //CIRED Seminar 2008:Smart Grids for Distribution. Frankfurt,Germany: IEEE,2008:1-4.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 马燕峰,俞人楠,刘会强,等. 基于 Hamilton 系统方法的 VSG 控制研究[J]. 电网技术,2017,41(8):2543-2552.
 MA Yanfeng, YU Rennan, LIU Huiqiang, et al. The analysis of VSG control algorithm based on Hamiltonian system[J]. Power System Technology,2017,41(8):2543-2552.
- [8] 韩刚,蔡旭. 虚拟同步发电机输出阻抗建模与弱电网适应性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):116-122.
 HAN Gang, CAI Xu. Output impedance modeling of virtual synchronous generator and its adaptability study in a weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(12): 116-122.
- [9]杨赟,梅飞,张宸宇,等.虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数 协同自适应控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(3): 125-131.
 YANG Yun,MEI Fei,ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Auto-
- [10] 孟建辉,石新春,王毅,等.改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J].电工技术学报,2015,30(4):70-79.
 MENG Jianhui,SHI Xinchun,WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,30(4):70-79.

mation Equipment, 2019, 39(3):125-131.

[11] 张玉治,张辉,贺大为,等.具有同步发电机特性的微电网逆变器控制[J].电工技术学报,2014,29(7):261-268.
 ZHANG Yuzhi,ZHANG Hui,HE Dawei, et al. Control strate-

gy of micro grid converters with synchronous generator characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014, 29(7):261-268.

[12] 颜湘武,刘正男,徐恒波,等.虚拟同步发电机特性的三相逆变器小信号建模及分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2016,43(3):1-8.
 YAN Xiangwu,LIU Zhengnan,XU Hengbo, et al. Small-signal wedeling and analysis of three phase characteristics of virtual

modeling and analysis of three-phase characteristics of virtual synchronous generator[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2016,43(3):1-8.

[13] 胡文强,吴在军,孙充勃,等. 基于 VSG 的储能系统并网逆变器 建模与参数整定方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8): 13-23.

HU Wenqiang, WU Zaijun, SUN Chongbo, et al. Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):13-23.

- [14] 张辉,王帆,李晓强,等.虚拟同步发电机并联运行的阻抗匹配 策略[J].电力系统自动化,2018,42(9):69-74.
 ZHANG Hui,WANG Fan,LI Xiaoqiang, et al. Impedance matching strategy for parallel virtual synchronous generators[J].
 Automation of Electric Power Systems,2018,42(9):69-74.
- [15] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
 LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2591-2603.

[16] 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): 5615-5624,5919.

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):5615-5624,5919.

[17] 刘倪,张昌华,廖丽,等. 计及无功电压环节的VSG虚拟转矩及 振荡失稳机理分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(6): 107-115.

LIU Ni, ZHANG Changhua, LIAO Li, et al. Analysis on virtual torque and oscillation instability mechanism of virtual synchronous generator with reactive power-voltage controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6):107-115.

[18] 杜文娟,王海风. 电力系统低频振荡阻尼转矩分析理论与方法 [M]. 北京:科学出版社,2015:311-344.

作者简介:



马燕峰(1978—),女,河北唐山人,副 教授,博士,研究方向为电力系统分析、运行 与控制(E-mail:ma_yanfeng01@163.com); 郑力文(1996—),女,河北唐山人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统分析、运 行与控制(E-mail:18713591731@163.com)。 (编辑 陆丹)

马燕峰

Damping torque analysis of virtual synchronous generator connected to power system

MA Yanfeng¹, ZHENG Liwen¹, HUO Yaxin¹, LIN Zijian², ZHAO Shuqiang¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Foshan Power Supply Bureau of China Southern Power Grid Corporation, Foshan 528000, China)

Abstract: Aiming at the AC system interconnected with voltage source inverter controlled by VSG (Virtual Synchronous Generator), the linearized model of single-machine infinite-bus system with VSG is established to analyze the influence of VSG-controlled renewable energy access on the low-frequency oscillation of power system. The damping torque analysis method is used to reveal the influence mechanism of VSG access on the electromechanical oscillation mode of power system, and DIgSILENT / PowerFactory simulation software is used to verify the simulation. The results show that VSG changes the overall system damping by providing damping torque to the electromechanical oscillation ring of synchronous generator in the system, thus affecting the oscillation stability of the power system.

Key words: VSG; single-machine infinite-bus system; low-frequency oscillation; modal analysis; damping torque

附录 A



- 图 A1 系统线性化模型
- Fig.A1 System linearization mode

附录 B

 $\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q + X_t + X_b & -X_b \\ X_q + X_t & X_w \end{bmatrix}^{-1}$ $\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b & -X_w - X_b \\ X'_d + X_t + X_b & -X_b \end{bmatrix}^{-1}$ $e_1 = -d_{11}V_{s0}\sin(\delta_0 - \theta_0) + d_{11}V_b\sin\delta_0 + d_{12}V_b\sin\delta_0$ $e_2 = d_{12} , \quad e_3 = d_{11}V_{s0}\sin(\delta_0 - \theta_0)$ $e_4 = d_{11}\cos(\delta_0 - \theta_0) , \quad e_5 = c_{11}V_b\cos\delta_0 + c_{12}V_{s0}\cos(\delta_0 - \theta_0)$ $e_6 = -c_{12}V_{s0}\cos(\delta_0 - \theta_0) , \quad e_7 = c_{12}\sin(\delta_0 - \theta_0)$ $K_1 = (X_q - X'_d)I_{td0}e_1 + E'_{q0}e_5 + (X_q - X'_d)I_{td0}e_5$ $K_2 = I_{tq0} + (X_q - X'_d)I_{tq0}e_2$ $K_{p\theta} = (X_q - X'_d)I_{tq0}e_3 + E'_{q0}e_6 + (X_q - X'_d)I_{td0}e_6$ $K_{pv} = (X_q - X'_d)I_{tw0}e_4 + E'_{q0}e_7 + (X_q - X'_d)I_{td0}e_7$

$$\begin{split} K_{3} &= 1 + (X_{d} - X'_{d})e_{2} , \quad K_{4} = (X_{d} - X'_{d})e_{1} \\ K_{E\theta} &= (X_{d} - X'_{d})e_{3} , \quad K_{Ev} = (X_{d} - X'_{d})e_{4} \\ K_{5} &= \frac{X'_{d}(X'_{d}I_{u0} - E'_{q0})e_{1} + X^{2}_{q}I_{u0}e_{5}}{\sqrt{(X_{q}I_{u0})^{2} + (E'_{q0} - X'_{d}I_{u0})^{2}}} , \quad K_{6} &= \frac{X'_{d}(X'_{d}I_{u0} - E'_{q0})e_{2} + (E'_{q0} - X'_{d}I_{u0})}{\sqrt{(X_{q}I_{u0})^{2} + (E'_{q0} - X'_{d}I_{u0})^{2}}} \\ K_{v\theta} &= \frac{X'_{d}(X'_{d}I_{u0} - E'_{q0})e_{3} + X^{2}_{q}I_{u0}e_{6}}{\sqrt{(X_{q}I_{u0})^{2} + (E'_{q0} - X'_{d}I_{u0})^{2}}} , \quad K_{vv} &= \frac{X'_{d}(X'_{d}I_{u0} - E'_{q0})e_{4} + X^{2}_{q}I_{u0}e_{7}}{\sqrt{(X_{q}I_{u0})^{2} + (E'_{q0} - X'_{d}I_{u0})^{2}}} \\ K_{pel} &= \frac{2V_{c1}^{2}\cos(2\delta_{10}) - V_{c10}V_{s0}\cos(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} , \quad K_{pc2} &= \frac{2V_{c10}\sin(2\delta_{10}) + V_{s0}\sin(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} \\ K_{qc1} &= \frac{V_{c10}V_{s0}\cos(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} , \quad K_{qc2} &= \frac{V_{c10}\sin(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} \\ K_{qe1} &= -\frac{V_{c10}V_{s0}\sin(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} , \quad K_{qc2} &= \frac{V_{c10}\cos(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} \\ K_{qq1} &= -\frac{V_{c10}V_{s0}\sin(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} , \quad K_{q2} &= \frac{V_{c10}\cos(\theta_{10} - \delta_{10})}{X_{1}} \\ K_{qs5} &= \frac{K_{qc1}}{1 + KK_{qc2}} , \quad K_{qq6} &= \frac{K_{q1}}{1 + KK_{qc2}} , \quad K_{qv_{1}} &= \frac{K_{q2}}{1 + KK_{qc2}} \end{split}$$

$$\begin{split} K_{\rm pv_1} &= K_{\rm p2} - K_{\rm pc2} K K_{\rm qv_1} \text{,} \quad K_{\rm p\theta_1} = K_{\rm p1} - K_{\rm pc2} K K_{\rm q\theta_1} \text{,} \quad K_{\rm p\delta_1} = K_{\rm pc1} - K_{\rm pc2} K K_{\rm q\delta_1} \\ K_9 &= \omega_0 \text{,} \quad K_{10} = -\frac{K_{\rm pv_1}}{J} \text{,} \quad K_{11} = -\frac{K_{\rm p\theta_1}}{J} \text{,} \quad K_{12} = -\frac{K_{\rm p\delta_1}}{J} \text{,} \quad K_{13} = -\frac{D_1}{J} \end{split}$$

线性化式(14)和式(15)得:

$$\Delta I_{wd} = \begin{bmatrix} d_{21} \left(-V_{s0} \sin \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) + V_{b0} \sin \delta_{0} \right) + d_{22} V_{b0} \sin \delta_{0} \end{bmatrix} \Delta \delta + d_{21} V_{s0} \sin \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) \Delta \theta_{1} + d_{21} \cos \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) \Delta V_{s} + d_{22} \Delta E_{q}' = b_{d1} \Delta \delta + b_{d2} \Delta \theta_{1} + b_{d3} \Delta V_{s} + b_{d4} \Delta E_{q}' \Delta I_{wq} = \begin{bmatrix} c_{21} V_{b0} \cos \delta_{0} + c_{22} V_{s0} \cos \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) \end{bmatrix} \Delta \delta - c_{22} V_{s0} \cos \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) \Delta \theta_{1} + c_{22} \sin \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) \Delta V_{s} = b_{q1} \Delta \delta + b_{q2} \Delta \theta_{1} + b_{q3} \Delta V_{s} \begin{cases} \Delta I_{vsgd} = R_{1} \Delta \delta + R_{2} \Delta E_{q}' + R_{3} \Delta \delta_{1} + R_{4} \Delta \theta_{1} + R_{5} \Delta V_{s} \\\Delta I_{vsgq} = R_{6} \Delta \delta + R_{7} \Delta E_{q}' + R_{8} \Delta \delta_{1} + R_{9} \Delta \theta_{1} + R_{10} \Delta V_{s} \end{cases} a_{1} = \sin \left(\delta_{0} - \delta_{10} \right), a_{2} = \cos \left(\delta_{0} - \delta_{10} \right), a_{3} = \sin \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right), a_{4} = \cos \left(\delta_{0} - \theta_{10} \right) \\a_{5} = \sin \delta_{0}, a_{6} = \cos \delta_{0} \\R_{1} = a_{2} \times b_{d1} - a_{1} \times b_{q1} - I_{wd0} \times a_{1} - I_{wq0} \times a_{2} \\R_{2} = a_{2} \times b_{d4} \\R_{3} = I_{wd0} \times a_{1} + I_{wq0} \times a_{2} \\R_{4} = a_{2} \times b_{d2} - a_{1} \times b_{q3} \\R_{5} = a_{2} \times b_{d3} - a_{1} \times b_{q3} \end{cases}$$

$$\begin{split} R_{6} &= a_{1} \times b_{d1} + a_{2} \times b_{q1} + I_{wd0} \times a_{2} - I_{wq0} \times a_{1} \\ R_{7} &= a_{1} \times b_{d4} \\ R_{8} &= -I_{wd0} \times a_{2} + I_{wq0} \times a_{1} \\ R_{9} &= a_{1} \times b_{d2} + a_{2} \times b_{q2} \\ R_{10} &= a_{1} \times b_{d3} + a_{2} \times b_{q3} \end{split}$$

联立式(16)和式(17)得:

$$A = \begin{bmatrix} R_4 - R_{13} & R_5 - R_{11} \\ R_9 & R_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 & -R_2 & R_{12} - R_3 \\ -R_6 & -R_7 & R_{14} - R_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E_q' \\ \Delta \delta_1 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_4 & b_5 & b_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E_q' \\ \Delta \delta_1 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{T_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T_{d0}} & \frac{1}{T_{d0}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_4 K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_4 K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{12} & K_{13} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{K_{P\theta}}{M} & -\frac{K_{PV}}{M} \\ -\frac{K_{E\theta}}{T_{d0}} & -\frac{K_{EV}}{T_{d0}} \\ -\frac{K_{A}K_{V\theta}}{T_{A}} & -\frac{K_{A}K_{VV}}{T_{A}} \\ 0 & 0 \\ K_{11} & K_{10} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1} & 0 & b_{2} & 0 & b_{3} & 0 \\ b_{4} & 0 & b_{5} & 0 & b_{6} & 0 \end{bmatrix}$$

附录 C



Fig.C1 VSG's forward channels for electromagnetic torque