

多虚拟同步发电机接入对电力系统机电振荡模式的影响

付强, 杜文娟*, 王海风

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Influence of Multi Virtual Synchronous Generators on Power System Electromechanical Oscillation Mode

FU Qiang, DU Wenjuan*, WANG Haifeng

(State Key laboratory of Alternate Electric Power Systems With New Energy Resources (North China Electric Power University),
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The closed-loop linear model of AC system with multiple voltage source converters (VSC) controlled by virtual synchronous generator (VSG) was established in this paper. The effect of multi virtual synchronous generators on the electromechanical oscillation mode of generator and another VSG was analyzed respectively, which mechanism was explained by damping torque analysis and proofed theoretically. The result shows that the strong dynamic and mode exclusion between subsystems will happen and lead to weak damping or electromechanical oscillation when the open-loop mode of VSG control subsystem is closed to the open-loop mode of AC subsystem or another VSG control. Finally, the nonlinear simulation of AC system with VSGs was carried out and verified the above results, based on this, a simple parameter adjustment method was proposed and related suggestions were given.

KEY WORDS: virtual synchronous generator; voltage source converter; damping torque analysis method; electromechanical oscillation

摘要: 以多个虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的电压源型换流站接入交流系统为研究对象, 建立含多个 VSG 的闭环系统线性化互联模型, 分析多个 VSG 接入对电力系统机电振荡模式的影响, 包括 VSG 接入对发电机机电振荡模式的影响和 VSG 接入对另一个 VSG 机电振荡模式的影响。采用阻尼转矩分析法揭示多个 VSG 接入对电力系统机电振荡模式的影响机理, 并进行理论验证, 得出: 当 VSG 控制子系统的开环模式与交流子系统的机电振荡模

式或者与另一个 VSG 控制子系统的开环模式接近时, 子系统间将产生强动态交互过程, 导致闭环模式相互排斥, 降低系统机电振荡模式的阻尼甚至引发机电振荡。最后, 对多个 VSG 接入的交流系统进行非线性仿真, 验证上述结论, 给出参数设定建议。

关键词: 虚拟同步发电机; 电压源型换流站; 阻尼转矩分析法; 机电振荡

0 引言

近年来, 随着可再生能源的大力开发和新能源电力系统的快速发展^[1], 以矢量控制为代表的电压源型换流站得到广泛应用^[2-3], 由其构成的柔性直流输电(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)系统成为解决远距离电能传输的有效方案^[4]。但是, 矢量控制换流站不具有旋转惯性^[5], 易引入谐波^[6], 无法为交流系统提供必要的电压和频率支撑, 降低电网运行的稳定性^[7]。为此, 模拟同步发电机的运行特性, 提出虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制, 增加系统惯性, 提供电压和频率支撑^[8-11], 引起众多学者的广泛关注。

目前针对 VSG 的研究主要分为两个方面: 第一方面是 VSG 接入交流系统后, 自身控制策略的优化及其控制参数的选择。例如文献[12]基于小干扰线性化模型, 通过对比传统无惯性下垂控制和 VSG 控制对系统惯性影响的差异, 提出基于 VSG 的下垂控制, 结合上述两种控制方式的优势, 并用时域仿真法进行验证。文献[13]基于单 VSG 无穷大

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900602)。

The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900602).

系统的线性化模型,设计新的解耦控制算法,实现VSG有功和无功的独立输出;进一步地,文献[14]采用小信号分析法深入研究解耦控制算法的参数设计,提出考虑系统稳定性裕量的参数设计方案,基于实物仿真验证方案的有效性。当多个VSG同时接入后,传统的VSG控制可能引发系统内功率振荡^[15],所以文献[15]采用模式分析法,通过调整虚拟定子电抗,提出VSG间暂态有功功率的优化分配方法,实现多个VSG间的协调控制;类似地,文献[16]考虑到VSG输出阻抗、线路阻抗和容量不匹配导致的无功输出偏差,采用模式分析法提出基于虚拟电容的无功分配策略,并在两馈入VSG实物系统中验证上述策略可以提升交流电压控制的准确性。

第二方面是VSG接入对交流系统稳定性的影响。例如文献[17]建立VSG的小信号分析模型,分析控制参数对交流系统稳定性的影响,提出控制参数的优化方案,对实际参数配置有一定的指导意义。文献[18]针对VSG控制与发电机间产生的谐振现象,采用频域法分析其对系统频率稳定性的影响,提出基于一阶控制环节的解决措施。文献[19]基于实物仿真,在原控制基础上提出一种新的阻尼控制方法,有效提升低频振荡的稳定性。对于多个VSG接入对系统稳定性的影响研究,目前研究较少,主要集中在控制参数对系统稳定性的影响分析。例如文献[20]采用时域仿真法提出多VSG接入后的稳定性评估和参数优化方法,文献[21]则采用模式分析法分析不同的VSG控制参数对交流系统振荡模式的影响规律,给出合理的参数选择范围。

综上,单个VSG接入对交流系统稳定性的影响研究已经比较广泛,得到频域分析法、模式分析法和实物仿真法等多种方法的验证,并提出多种解决措施。但是对于多个VSG接入对交流系统稳定性的影响研究,仍面临以下挑战:

1) 目前的稳定性机理研究主要集中在单个VSG接入对系统机电振荡模式的影响,在多个VSG接入对系统机电振荡模式的影响方面,一般采用模式分析法和时域仿真法,仅针对现象和结果层面进行分析,对应的物理机理解释有待完善。

2) 目前提出的参数优化方法和阻尼控制方法虽然可以改善机电振荡模式的阻尼特性,但是较为复杂,仍存在较大的简化空间。

本文研究多个VSG接入对交流系统机电振荡

模式的影响机理,主要贡献如下:

1) 将VSG控制子系统和剩余子系统分别单独建模,形成VSG控制子系统作为反馈环节,剩余子系统作为前馈环节的线性化闭环互联系统,有利于分析VSG控制子系统和剩余子系统间的动态交互过程,降低建模和分析的复杂度。

2) 采用阻尼转矩法分析VSG控制对系统机电振荡过程的影响机理,发现多VSG接入对交流系统机电振荡模式的影响体现在两个方面:一是VSG接入对发电机主导的机电模式产生影响,另一则是VSG接入对另一个VSG的机电振荡模式产生影响。

3) 理论证明:当VSG控制子系统的开环模式与剩余子系统中任意一个开环模式接近时,子系统间将产生强烈的动态交互过程,导致闭环模式排斥,降低系统机电振荡模式的阻尼,严重地将引发系统机电振荡,从而威胁系统的稳定性。

1 含多个VSG的交流系统线性化互联模型

如图1所示为含多个VSG的多机交流系统,共有 M 个VSG和 N 个发电机(synchronous generator, SG)。 $X_i(i=1,2,\dots,N+M)$ 为VSG与交流系统连接线路上的电感, $V_i=\theta_i(i=1,2,\dots,N+M)$ 为VSG与交流系统连接处的节点电压及相角, $V_{ci}=\theta_{ci}(i=1,2,\dots,M)$ 为VSG输出的电压幅值及相角, $V_{gi}=\theta_{gi}(i=1,2,\dots,N)$ 为SG输出的电压幅值及相角, $P_i+jQ_i(i=1,2,\dots,N+M)$ 为VSG- i 与剩余子系统间的动态交互功率。以图1中虚线为分界线,可分别建立VSG控制子系统的开环线性化模型和剩余VSG和发电机子系统(后简称剩余子系统)的开环线性化模型,考虑到本文的研究对象主要为机电频段,所以忽略系统中的高频动态过程以简化研究。

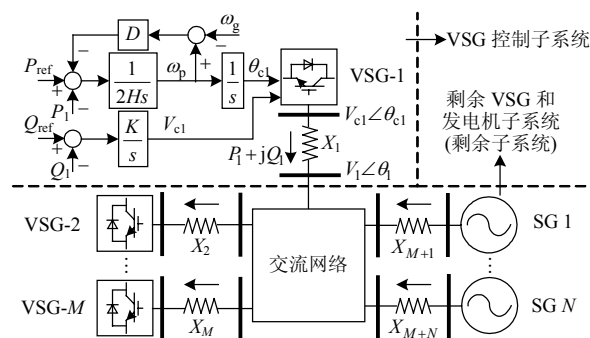


图1 含多个VSG的交流系统

Fig. 1 AC system with multi VSGs

1.1 VSG控制子系统的开环线性化模型

VSG采用文献[22]中的控制策略,如图1所示。

其中 ω_p 为 VSG 等效内电势的频率, ω_g 为电网实际频率, ω_0 为电网基值频率, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功和无功的设定值, H 和 D 分别为虚拟同步机的惯性常数与阻尼系数, K 为无功控制器的增益系数。不失一般性, 本文以 VSG-1 为例进行建模分析, 有:

$$\begin{cases} \omega_g = \frac{1}{2Hs + D}(P_{\text{ref}} - P_1) \\ \theta_c = \frac{\omega_g}{s} \\ V_{c1} = \frac{K}{s}(Q_{\text{ref}} - Q_1) \end{cases} \quad (1)$$

考虑到 VSG 与交流系统的连接线路及其节点电压和相角, 有^[23]:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{V_{c1}^2 \sin(2\theta_{c1}) + V_{c1}V_1 \sin(\theta_1 - \theta_{c1})}{X_1} \\ Q_1 = \frac{V_{c1}V_1 \cos(\theta_1 - \theta_{c1}) - V_{c1}^2 \cos(2\theta_{c1})}{X_1} \end{cases} \quad (2)$$

进一步地, 对式(1)、(2)线性化, 可得:

$$\begin{cases} s\delta_{c1} = \omega_0 \Delta\omega_p \\ 2Hs\Delta\omega_p = -\Delta P_1 - D\Delta\omega_p \\ s\Delta V_{c1} = -K\Delta Q_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta P_1 = K_{pc1}\Delta\theta_{c1} + K_{pc2}\Delta V_{c1} + K_{p1}\Delta\theta_1 + K_{p2}\Delta V_1 \\ \Delta Q_1 = K_{qc1}\Delta\theta_{c1} + K_{qc2}\Delta V_{c1} + K_{q1}\Delta\theta_1 + K_{q2}\Delta V_1 \end{cases} \quad (4)$$

联立式(3)、(4), VSG 控制子系统的开环状态空间矩阵如式(5)所示, 矩阵 A_{vsg} 的特征值 λ_{vsg1} 为 VSG 控制子系统的开环模式。

$$\begin{cases} s\Delta X_{\text{vsg}} = A_{\text{vsg}}\Delta X_{\text{vsg}} + b_{\text{vsg1}}\Delta\theta_1 + b_{\text{vsg2}}\Delta V_1 \\ \Delta P_1 = c_{\text{vsgp}}^T \Delta X_{\text{vsg}} + d_{\text{vsgp1}}\Delta\theta_1 + d_{\text{vsgp2}}\Delta V_1 \\ \Delta Q_1 = c_{\text{vsgq}}^T \Delta X_{\text{vsg}} + d_{\text{vsgq1}}\Delta\theta_1 + d_{\text{vsgq2}}\Delta V_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta X_{\text{vsg}} = \begin{bmatrix} \Delta\omega_p \\ \Delta\theta_{c1} \\ \Delta V_{c1} \end{bmatrix} \\ A_{\text{vsg}} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H} & -\frac{K_{pc1}}{2H} & -\frac{K_{pc2}}{2H} \\ \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & -KK_{qc1} & -KK_{qc2} \end{bmatrix} \\ b_{\text{vsg1}} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{2H} \\ 0 \\ -KK_{q1} \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$\begin{cases} b_{\text{vsg2}} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p2}}{2H} \\ 0 \\ -KK_{q2} \end{bmatrix} \\ c_{\text{vsgp}}^T = [0 \quad K_{pc1} \quad K_{pc2}] \\ d_{\text{vsgp1}} = K_{p1} \\ d_{\text{vsgp2}} = K_{p2} \\ c_{\text{vsgq}}^T = [0 \quad K_{qc1} \quad K_{qc2}] \\ d_{\text{vsgq1}} = K_{q1} \\ d_{\text{vsgq2}} = K_{q2} \end{cases}$$

依据式(5), 可得出 VSG 控制子系统的开环传递函数为

$$\begin{cases} \Delta P_1 = H_{vp}(s)\Delta V_1 + H_{\theta p}(s)\Delta\theta_1 \\ \Delta Q_1 = H_{vq}(s)\Delta V_1 + H_{\theta q}(s)\Delta\theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} H_{vp}(s) = c_{\text{vsgp}}^T (sI - A_{\text{vsg}})^{-1} b_{\text{vsg1}} + d_{\text{vsgp1}} \\ H_{\theta p}(s) = c_{\text{vsgp}}^T (sI - A_{\text{vsg}})^{-1} b_{\text{vsg2}} + d_{\text{vsgp2}} \\ H_{vq}(s) = c_{\text{vsgq}}^T (sI - A_{\text{vsg}})^{-1} b_{\text{vsg1}} + d_{\text{vsgp1}} \\ H_{\theta q}(s) = c_{\text{vsgq}}^T (sI - A_{\text{vsg}})^{-1} b_{\text{vsg2}} + d_{\text{vsgp2}} \end{cases}$$

至此, 建立以 ΔP_1 、 ΔQ_1 为输出信号, ΔV_1 、 $\Delta\theta_1$ 为输入信号的 VSG 子系统开环线性化模型。

1.2 剩余子系统的开环线性化模型

与 VSG 控制子系统对应, 可建立剩余子系统的开环状态空间矩阵如式(7)所示, 其输入信号为 ΔP_1 、 ΔQ_1 , 输出信号为 ΔV_1 、 $\Delta\theta_1$ ^[24]。

$$\begin{cases} s\Delta X_{\text{ac}} = A_{\text{ac}}\Delta X_{\text{ac}} + b_{\text{ac1}}\Delta P_1 + b_{\text{ac2}}\Delta Q_1 \\ \Delta V_1 = c_{\text{acv}}^T \Delta X_{\text{ac}} + d_{\text{acv1}}\Delta P_1 + d_{\text{acv2}}\Delta Q_1 \\ \Delta\theta_1 = c_{\text{ac}\theta}^T \Delta X_{\text{ac}} + d_{\text{ac}\theta1}\Delta P_1 + d_{\text{ac}\theta2}\Delta Q_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中矩阵 A_{ac} 的特征值 $\lambda_{\text{ac}j}(j=2,3,\dots,N+M)$ 即为剩余子系统的开环模式。类似地, 可求得剩余子系统的开环传递函数如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta V_1 = G_{vp}(s)\Delta P_1 + G_{vq}(s)\Delta Q_1 \\ \Delta\theta_1 = G_{\theta p}(s)\Delta P_1 + G_{\theta q}(s)\Delta Q_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} G_{vp}(s) = c_{\text{acv}}^T (sI - A_{\text{ac}})^{-1} b_{\text{ac1}} + d_{\text{acv1}} \\ G_{vq}(s) = c_{\text{acv}}^T (sI - A_{\text{ac}})^{-1} b_{\text{ac2}} + d_{\text{acv2}} \\ G_{\theta p}(s) = c_{\text{ac}\theta}^T (sI - A_{\text{ac}})^{-1} b_{\text{ac1}} + d_{\text{ac}\theta1} \\ G_{\theta q}(s) = c_{\text{ac}\theta}^T (sI - A_{\text{ac}})^{-1} b_{\text{ac2}} + d_{\text{ac}\theta2} \end{cases}$$

至此,建立以 ΔV_1 、 $\Delta \theta_1$ 为输出信号, ΔP_1 、 ΔQ_1 为输入信号的剩余子系统开环线性化模型。

1.3 含多个VSG的交流系统线性化互联模型

联立式(5)和(7),可得含多个VSG的交流系统闭环线性化状态空间矩阵为

$$\frac{d}{dt} \Delta X = A \Delta X, \quad X = \begin{bmatrix} X_{\text{vsg}} \\ X_{\text{ac}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:矩阵 X 为闭环系统中全部的状态变量;矩阵 A 的特征值即为闭环系统的振荡模式,可通过式(5)和(7)联立求得,包括VSG控制子系统的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg}1}$ 和剩余子系统的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{ac}j}$ ($j=2,3,\dots,N+M$)。

同理,可得出VSG作为反馈环节,剩余子系统作为前馈环节的闭环互联系统传递函数,如图2所示。

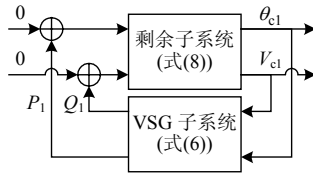


图2 闭环互联系统传递函数框图

Fig. 2 Block diagram of transfer function of closed loop interconnected system

由图2可知,闭环互联系统的稳定性主要取决于三个方面:剩余子系统的开环稳定性、VSG的开环稳定性和VSG与剩余子系统间的动态交互过程(ΔP_1 、 ΔQ_1)。一般情况下,剩余子系统和VSG均是开环稳定的,即剩余子系统和VSG的开环模式(A_{ac} 、 A_{vsg} 的特征值)均在复平面左侧,所以VSG的接入导致电力系统发生振荡的本质原因是VSG与剩余子系统间的动态交互过程(ΔP_1 、 ΔQ_1)对剩余子系统的动态交互影响非常微弱,可近似认为两个子系统间是独立运行的,此时闭环系统的模式与子系统的开环模式近似相等,保持稳定;反之,VSG控制子系统将通过动态交互过程 ΔP_1 、 ΔQ_1 对剩余子系统的动态特性产生影响(如式(7)所示),并引起闭环系统振荡模式的变化(如式(9)所示),如果导致闭环系统的模式位于复平面右侧,则会引发电力系统的振荡现象。

综上,可以通过子系统间动态交互过程 ΔP_1 、 ΔQ_1 的强弱来定性分析VSG接入对剩余子系统动态特性的影响大小,并采用阻尼转矩分析法将上述

影响进行进一步量化,以得出VSG接入对剩余子系统机电振荡模式的影响。

2 VSG控制对交流系统机电振荡模式的影响机理分析

2.1 阻尼转矩分析法

将式(7)所示线性化模型写为等效形式:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \omega_0 \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{A}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{b}_{p2} \\ \mathbf{b}_{p3} \end{bmatrix} \Delta P_1 + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{b}_{q2} \\ \mathbf{b}_{q3} \end{bmatrix} \Delta Q_1 \quad (10)$$

式中: $\Delta \theta$ 代表剩余子系统中发电机或者VSG输出功角所形成的矢量矩阵; $\Delta \omega$ 代表剩余子系统中发电机或者VSG输出的同步转速; Δz 为剩余状态变量形成的矢量矩阵; ΔP_1 、 ΔQ_1 分别是VSG-1输出有功功率和无功功率的变化量,并有:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} = H(s) \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{vp}(s) & H_{\theta p}(s) \\ H_{vq}(s) & H_{\theta q}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta \theta_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(10)、(11)可得VSG-1向剩余子系统提供的电磁转矩为

$$\Delta T_{\text{DC}} = \mathbf{g}_{p1}(s) \Delta P_1 + \mathbf{g}_{q1}(s) \Delta Q_1 = \mathbf{g}_{p1}(s) (H_{vp}(s) \Delta V_1 + H_{\theta p}(s) \Delta \theta_1) + \mathbf{g}_{q1}(s) (H_{vq}(s) \Delta V_1 + H_{\theta q}(s) \Delta \theta_1) \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{g}_{p1}(s) = \mathbf{b}_{p2} + \mathbf{A}_{23}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{33})^{-1} \mathbf{b}_{p3} \\ \mathbf{g}_{q1}(s) = \mathbf{b}_{q2} + \mathbf{A}_{23}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{33})^{-1} \mathbf{b}_{q3} \end{cases}$$

在复频率 $\lambda_{\text{ac}j}$ 下,一般有式(13)成立^[23,25]。

$$\begin{cases} \Delta V_1 = \gamma_{vm}(\lambda_{\text{ac}j}) \Delta \omega_m \\ \Delta \theta_1 = \gamma_{\delta m}(\lambda_{\text{ac}j}) \Delta \omega_m \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\Delta \omega_m$ ($m=2,3,\dots,N+M$)表示第 m 个发电机(或者VSG)的转速变化量。

因此,在复频率 $\lambda_{\text{ac}j}$ 下,VSG向第 m 个发电机(或者VSG)机电振荡回路提供的阻尼转矩为

$$\Delta T_{\text{dm}} = \text{Re}(\mathbf{g}_{p1m}(\lambda_{\text{ac}j}) H_{vp}(s) \gamma_{vm}(\lambda_{\text{ac}j}) + \mathbf{g}_{p1m}(\lambda_{\text{ac}j}) \cdot H_{\theta p}(s) \gamma_{\delta m}(\lambda_{\text{ac}j}) + \mathbf{g}_{q1m}(\lambda_{\text{ac}j}) H_{vq}(s) \gamma_{vm}(\lambda_{\text{ac}j}) + \mathbf{g}_{q1m}(\lambda_{\text{ac}j}) H_{\theta q}(s) \gamma_{\delta m}(\lambda_{\text{ac}j})) \Delta \omega_m = d_m \Delta \omega_m \quad (14)$$

式中: $\mathbf{g}_{p1m}(s)$ 和 $\mathbf{g}_{q1m}(s)$, $s = \lambda_{\text{ac}j}$,分别是 $\mathbf{g}_{p1}(s)$ 和 $\mathbf{g}_{q1}(s)$ 的第 m 个元素; $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部的值。

定义 $S_{jm} = \lambda_{acj} / \Delta d_m (j=2,3,\dots,N+M-1)$ 表示模式 λ_{acj} 对第 m 台发电机(或者 VSG)阻尼系数 d_m 的灵敏度, 则 VSG-1 接入对模式 λ_{acj} 的总影响可以由式(15)计算得出。

$$\Delta \lambda_{acj} = \sum_{m=2}^{N+M} S_{jm} d_m \quad (15)$$

综上, VSG 对系统机电振荡模式的影响路径如图 3 所示, 是多条路径共同影响的结果。

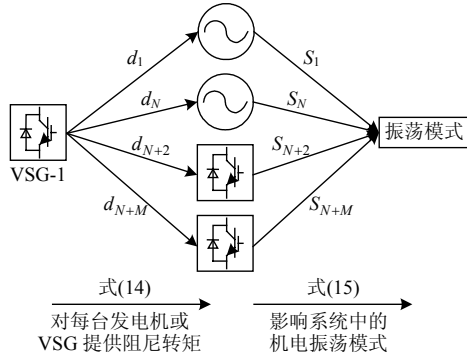


图 3 VSG 对机电振荡模式的影响示意图

Fig. 3 Impact of VSG on electromechanical oscillation mode

2.2 VSG 控制与剩余子系统间的强动态过程

由图 3 和式(14)、(15)可知, VSG 控制对剩余子系统中机电振荡模式的影响大小 $\Delta \lambda_{acj}$ 取决于 VSG 对每台发电机提供的阻尼转矩 ΔT_{dm} 和机电振荡模式 λ_{acj} 对发电机阻尼转矩系数 d_m 的灵敏度 S_{jm} , 考虑到 S_{jm} 由系统自身特性决定, 与 VSG 控制无关, 所以 VSG 控制对剩余子系统中机电振荡模式的影响主要是通过阻尼转矩 ΔT_{dm} 来实现的。

由式(14)可知, ΔT_{dm} 在复频率 λ_{acj} 下的大小受两部分影响, 一部分是 VSG 控制系统的传递函数 $H(\lambda_{acj})$ 的大小, 另一部分是系统自身的传递函数 $g_{p,q1}(\lambda_{acj})$ 和 $\gamma_{v,0m}(\lambda_{acj})$ 的大小。当 VSG-1 控制子系统的开环模式 $\lambda_{vsg1}(H(s)$ 的极点)与剩余子系统的开环模式 $\lambda_{acj}(g_{p,q1}(\lambda_{acj})$ 和 $\gamma_{v,0m}(\lambda_{acj})$ 的极点)接近时, 在复频率 λ_{acj} 下, 将有 $\lambda_{vsg1} = \lambda_{acj}$, 此时 $H(\lambda_{acj})$ 的幅值将会变大, 由式(11)和(12)可知, VSG-1 提供的电磁转矩 ΔT_{DC} 和子系统间的动态过程 ΔP_1 、 ΔQ_1 将随之增加。特殊地, 当 $\lambda_{vsg1} = \lambda_{acj}$, 将有 $H(\lambda_{acj}) = \infty$, 此时子系统间的动态交互过程 ΔP_1 、 ΔQ_1 也将出现剧烈波动, 对系统稳定性带来威胁。

进一步地, 对上述强动态交互过程对机电振荡模式的影响计算如下:

对于图 2 中的闭环系统, 结合式(6)和(8), 可得

VSG 接入后闭环系统的振荡模式 $\hat{\lambda}_{vsg1}$, $\hat{\lambda}_{acj}$ 为式(16)的解:

$$\begin{cases} I - G(s)H(s) = 0 \\ G(s) = \begin{bmatrix} G_{vp}(s) & G_{0p}(s) \\ G_{vq}(s) & G_{0q}(s) \end{bmatrix} \\ H(s) = \begin{bmatrix} H_{vp}(s) & H_{0p}(s) \\ H_{vq}(s) & H_{0q}(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

考虑到 λ_{acj} 是 $G(s)$ 的开环振荡模式, λ_{vsg1} 是 $H(s)$ 的开环振荡模式, 则有式(17)成立:

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_R(s)}{s - \lambda_{acj}} \\ H(s) = \frac{H_R(s)}{s - \lambda_{vsg1}} \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可得:

$$\begin{cases} |(s - \lambda_{acj})(s - \lambda_{vsg1})K(s) - I| = 0 \\ K(s) = G_R(s)H_R(s) = \begin{bmatrix} k_{11}(s) & k_{12}(s) \\ k_{21}(s) & k_{22}(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)可进一步展开为

$$\begin{vmatrix} (s - \lambda_{acj})(s - \lambda_{vsg1})k_{11}(s) - 1 & (s - \lambda_{acj})(s - \lambda_{vsg1})k_{12}(s) \\ (s - \lambda_{acj})(s - \lambda_{vsg1})k_{21}(s) & (s - \lambda_{acj})(s - \lambda_{vsg1})k_{22}(s) - 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (19)$$

当 $\lambda_{vsg1} = \lambda_{acj}$, 将 $\hat{\lambda}_{acj} = \lambda_{acj} + \Delta \lambda_{acj}$ 代入式(19)可得:

$$\begin{aligned} & (k_{11}(\hat{\lambda}_{acj})k_{22}(\hat{\lambda}_{acj}) - k_{12}(\hat{\lambda}_{acj})k_{21}(\hat{\lambda}_{acj}))\Delta \lambda_{acj}^4 - \\ & (k_{11}(\hat{\lambda}_{acj}) + k_{22}(\hat{\lambda}_{acj}))\Delta \lambda_{acj}^2 + 1 \approx 0 \end{aligned} \quad (20)$$

将 $k_{11}(\hat{\lambda}_{acj})$, $k_{22}(\hat{\lambda}_{acj})$ 在 λ_{acj} 处进行泰勒级数展开, 并取一阶项。

$$\begin{cases} k_{11}(\hat{\lambda}_{acj}) = k_{11}(\lambda_{acj} + \Delta \lambda_{acj}) \approx k_{11}(\lambda_{acj}) + k'_{11}(\lambda_{acj})\Delta \lambda_{acj} \\ k_{22}(\hat{\lambda}_{acj}) = k_{22}(\lambda_{acj} + \Delta \lambda_{acj}) \approx k_{22}(\lambda_{acj}) + k'_{22}(\lambda_{acj})\Delta \lambda_{acj} \end{cases} \quad (21)$$

忽略式(20)中的 4 阶项, 并将式(21)代入, 可求得交流侧闭环机电模式的变化量为

$$\Delta \lambda_{acj} \approx \pm \sqrt{\frac{1}{k_{11}(\lambda_{acj}) + k_{22}(\lambda_{acj})}} = \pm k(\lambda_{acj}) \quad (22)$$

同理, 可得接入 VSG 闭环机电模式变化量为

$$\Delta \lambda_{vsg1} \approx \pm \sqrt{\frac{1}{k_{11}(\lambda_{vsg1}) + k_{22}(\lambda_{vsg1})}} = \pm k(\lambda_{vsg1}) \quad (23)$$

综合前面的分析和式(22)、(23), 可得当子系统

的开环模式 λ_{vsg1} , λ_{acj} 相互接近时, 系统间将产生强烈的动态交互作用, 其对应的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$, $\hat{\lambda}_{\text{acj}}$ 将向两侧发生排斥, 导致阻尼下降, 当排斥的幅度超过其开环模式的实部时, 系统将产生机电振荡现象。

考虑到 VSG 和发电机在控制上的相似性, 上述分析可以总结并拓展为以下两点:

- 1) 当接入 VSG 的开环模式与系统中任意发电机的振荡模式接近时, 将与该发电机间产生强烈的动态交互过程 ΔP_1 、 ΔQ_1 , 导致闭环模式排斥, 从而威胁系统在机电频带下的稳定性。
- 2) 当多个 VSG 控制的开环模式相互接近时, VSG 控制间将产生强烈的动态交互过程 ΔP_1 、 ΔQ_1 , 导致闭环模式排斥, 波及到整体系统的稳定性。

3 案例验证

3.1 系统介绍

如图 4 所示是 1 个含有 3 台 VSG 和 2 台发电机的交流系统, 其中发电机采用文献[23]的模型及其参数, VSG 采用文献[22]的模型及其参数。不失一般性, 案例以接入 VSG-3 为研究对象, 从 VSG 接入对发电机机电振荡模式的影响和 VSG 接入对另一个 VSG 机电振荡模式的影响两个方面验证: 当接入 VSG 的开环模式与系统中原有的开环机电模式重合时, 会降低闭环系统机电振荡模式的阻尼, 甚至可能引发机电振荡。

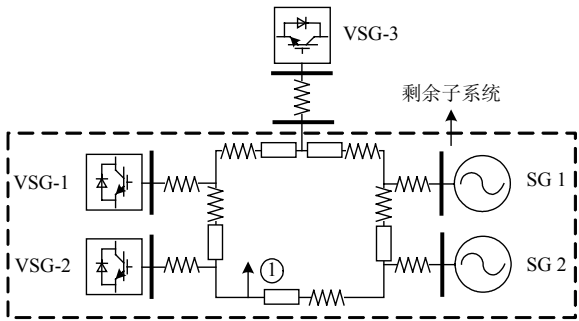


图 4 含多个 VSG 的交流系统

Fig. 4 The AC system with multi VSGs

在 VSG-3 接入前, 计算得到剩余子系统中共有 4 个开环机电模式, 根据模式参与性, 确定各个模式对应的发电机和 VSG 编号如表 1 第 2 行所示。

3.2 VSG 接入对发电机机电振荡模式的影响

依据 2.2 节中的理论分析, VSG-3 的开环模式应该远离系统中现有的开环模式, 以避免强交互的发生。否则, 将产生模式排斥, 降低系统中机电振荡模式的阻尼, 验证如下:

表 1 图 4 系统中的开闭环振荡模式

Tab. 1 The open-loop and closed-loop electromechanical oscillation model in Fig. 4

器件	开环机电模式	闭环机电模式
发电机 1	-0.299+j3.57	-0.135+j3.64
发电机 2	-0.279+j2.23	-0.278+j2.29
VSG-1	-0.283+j4.96	-0.283+j4.94
VSG-2	-0.420+j6.01	-0.418+j6.00
VSG-3	-0.302+j3.57	-0.445+j3.64

调整 VSG-3 的参数使得其开环模式与发电机机电振荡模式接近, 如表 1 第 2 行最后一列所示。然后将 VSG-3 接入, 得出系统的闭环振荡模式如表 1 第 3 行所示。

由表 1 可知, 当 VSG-3 的开环模式 λ_{vsg3} 与发电机 1 的开环模式 λ_{sg1} 接近时, VSG-3 接入后的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg3}}$ 和发电机 1 的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{sg1}}$ 将产生排斥现象, $\hat{\lambda}_{\text{sg1}}$ 的阻尼明显降低, 而其它模式并未发生较大的改变。这说明了由于二者开环模式的接近, VSG-3 与发电机 1 间产生了较强的动态交互作用, 导致了闭环模式排斥, 降低了系统中发电机 1 原有机电振荡模式的阻尼。

图 5(a)给出闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{sg1}}$ 的参与因子。可知: 闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{sg1}}$ 中, VSG-3 和发电机 1 的状态变量均有较高的参与性, 验证了发电机 1 和 VSG-3 之间的确存在较强的动态交互作用。

调节 VSG-3 的控制参数使得 λ_{vsg3} 远离 λ_{sg1} , 系统中的模式轨迹如图 6 所示。可知: 随着参数从 $H=30.72$ 、 $D=17.35$ 调节到 $H=39.5$ 、 $D=21.75$, VSG-3 的开环模式 λ_{vsg3} 从点 B 移动到了点 A, 远离了发电机 1 的开环模式 λ_{sg1} , 此时, 系统的闭环模式逐渐与开环模式重合, 并有 $\lambda_{\text{sg1}} \approx \hat{\lambda}_{\text{sg1}}$ 、 $\lambda_{\text{vsg3}} \approx \hat{\lambda}_{\text{vsg3}}$, 说明了随着开环模式的远离, VSG-3 与 SG1

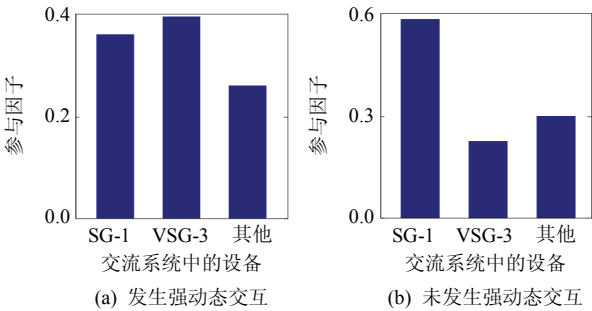


图 5 模式 $\hat{\lambda}_{\text{sg1}}$ 的参与因子

Fig. 5 Participation factor of $\hat{\lambda}_{\text{sg1}}$

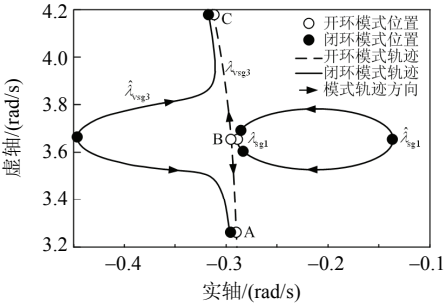


图 6 随 $\lambda_{\text{vsg}3}$ 变化的系统根轨迹

Fig. 6 System root locus with variation of $\lambda_{\text{vsg}3}$

间的动态交互过程减弱，模式排斥消失，机电振荡模式的阻尼得到了恢复。同理，调节参数从 $H=30.72$ 、 $D=17.35$ 到 $H=20.45$ 、 $D=12.23$ ，开环模式 $\lambda_{\text{vsg}3}$ 将从点 B 移动至点 C，此时模式 $\hat{\lambda}_{\text{sg}1}$ 的参与性如图 5(b)所示，可见 VSG-3 状态变量的参与性显著下降，之间的强交互现象消失。综上，可得出：调节参数使得开环模式相互远离可以有效降低子系统间的动态交互作用，避免模式排斥，保持系统的稳定性。

最后，对图 4 中的系统进行非线性仿真，在 0.1s 于节点①处增加 20% 的有功负荷，并于 0.2s 时消除，非线性仿真结果如图 7 所示。

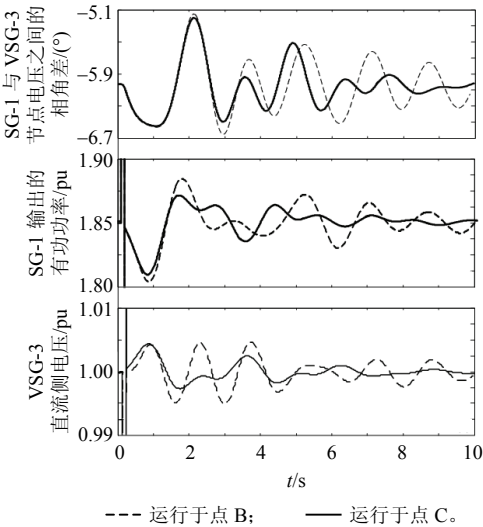


图 7 非线性仿真结果

Fig. 7 Nonlinear simulation results

通过对比图 7 中点 B 和点 C 处的非线性仿真结果，可以发现：当 VSG-3 与发电机 1 产生强动态交互过程时，VSG-3 的有功功率产生了较强的功率波动，降低了系统中机电振荡的阻尼，对系统产生了不利影响；当调节参数使得开环模式远离后(点 C)，子系统间的动态过程减弱，系统中机电振荡的阻尼有所回升，与图 6 的分析结果一致。

虽然以 VSG-3 的接入为例进行了分析，但上述分析可推广得出以下一般性结论：

1) 当接入 VSG 的开环模式与系统中任意发电机的开环模式接近时，子系统间将产生强烈的动态交互作用，导致闭环模式相互排斥，降低了系统机电振荡模式的阻尼，影响了系统在机电频带下的稳定性。

2) 考虑到上述现象的本质是由于子系统间开环模式接近造成的，所以可以通过调节 VSG 的控制参数，使得子系统间开环模式相互远离，避免强动态交互过程带来的不利影响。

3.3 VSG 接入对另一个 VSG 机电振荡模式的影响

同理，VSG 与 VSG 之间也会发生强动态交互过程，影响系统机电振荡模式的阻尼，可以通过选取合适的参数进行消除，简要说明如下。

当 VSG-3 的开环控制模式 $\lambda_{\text{vsg}3}$ 与 VSG-1 的开环模式 $\lambda_{\text{vsg}1}$ 接近时，将发生强烈的功率交互现象，并导致 VSG-1 的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg}1}$ 失稳，如表 2 所示。

表 2 图 4 系统中的开闭环振荡模式

Tab. 2 The open-loop and closed-loop electromechanical oscillation model in Fig.4

器件	开环模式	闭环模式
发电机 1	$-0.135 + j3.64$	$-0.135 + j3.64$
发电机 2	$-0.278 + j2.29$	$-0.278 + j2.29$
VSG-1	$-0.283 + j4.94$	$0.125 + j5.01$
VSG-2	$-0.418 + j6.00$	$-0.395 + j5.89$
VSG-3	$-0.335 + j5.05$	$-0.746 + j5.16$

此时 VSG-1 和 VSG-3 的状态变量将在 VSG-1 的闭环模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg}1}$ 中呈现较高的参与性，如图 8(a)所示，并可通过调节参数简便地消除：如图 9 中区域 A 所示，调节 VSG-3 的控制参数从 $H=17.35$ 、 $D=8.77$ 到 $H=20.45$ 、 $D=12.23$ ，开环模式 $\lambda_{\text{vsg}3}$ 将从点 D 移至点 C，远离 $\lambda_{\text{vsg}1}$ 。此时模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg}1}$ 的参与

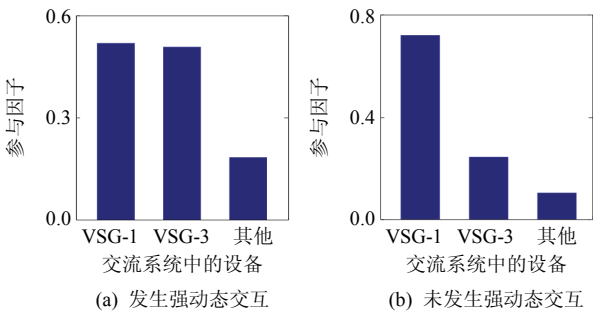
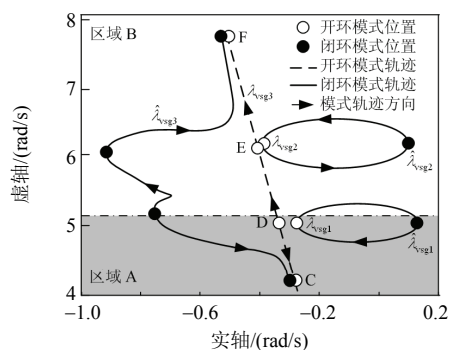


图 8 模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg}1}$ 的参与因子

Fig. 8 Participation factor of $\hat{\lambda}_{\text{vsg}1}$

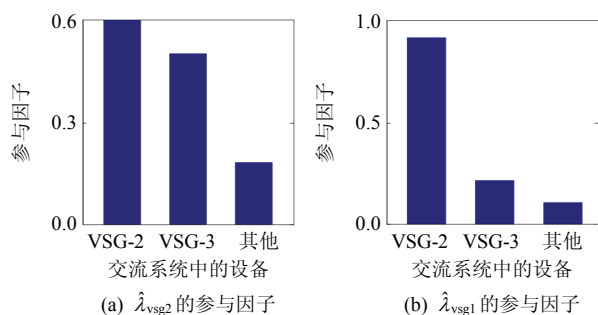
图9 随 λ_{vsg3} 变化的系统根轨迹Fig. 9 System root locus with variation of λ_{vsg3}

性如图8(b)所示, VSG-3和VSG-1间的强动态过程得以消除, 模式排斥消失, 系统恢复稳定。

但是, 随着并网VSG的增多, VSG与VSG控制模式重合的概率会大大增加, 将增大VSG间发生强动态交互的风险, 说明如下:

如图9区域B所示, 当VSG-3的控制参数从 $H=13.55$ 、 $D=8.77$ 调节到 $H=8.15$ 、 $D=6.08$ 时, 开环模式 λ_{vsg3} 将从点D移动到点E, 远离了 λ_{vsg1} , 结合图10(b)的参与性分析结果, 可知上述参数调整方式成功消除了与VSG-1间的强动态交互过程, 使得系统恢复稳定。但是, 由于VSG数量较多, 导致模式分布较为紧密, 当VSG-3的开环模式位于点E时, 将与VSG-2产生强烈的动态交互过程, 并再次导致系统失稳, 此时VSG-2闭环模式 $\hat{\lambda}_{vsg2}$ 的参与性如图10(a)所示。

上述分析充分论证了: 当接入的VSG数量太多时, 将大大加强交互发生的风险, 给参数的设定带来困难。为了避免上述情况, 应综合考虑低频段内全部的机电振荡模式, 在复平面内合理规划接入VSG的模式位置, 以避免开环模式相互接近的情况。以本文图4的案例为例, 可考虑将VSG-3的开环模式 λ_{vsg3} 设置于VSG-2模式的上方 $H=$

图10 模式 $\hat{\lambda}_{vsg1}$ 和 $\hat{\lambda}_{vsg2}$ 的参与因子Fig. 10 Participation factor of $\hat{\lambda}_{vsg1}$ and $\hat{\lambda}_{vsg2}$

6.56、 $D=5.28$ (图9中点F), 避免与其他机电模式接近。

最后, 对点F和点E处的运行工况进行非线性仿真, 验证分析正确性和参数调整的有效性。系统在0.1s于节点①处增加20%的有功负荷, 并于0.2s时消除, 结果如图11所示。

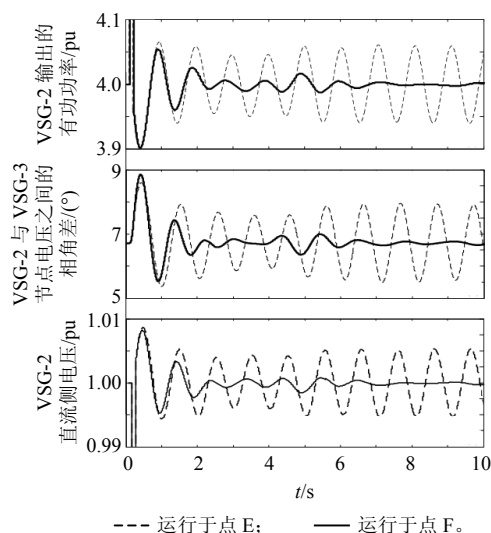


图11 非线性仿真结果

Fig. 11 Nonlinear simulation results

4 结论

本文基于含多个VSG的交流系统线性化互联模型, 采用阻尼转矩法分析了VSG接入对系统机电振荡模式的影响机理并进行了论证, 给出了参数设定的建议, 主要有以下结论:

1) 当接入VSG的开环模式与系统中任意发电机或者VSG的开环模式接近时, 可能导致系统中的机电振荡模式发生排斥现象, 降低甚至破坏系统在机电频带下的稳定性。

2) 上述现象的物理机理解释是: 子系统间的开环模式接近时, 接入的VSG将会给系统提供一个幅值较大的电磁转矩, 引起VSG与系统间动态交互功率的剧烈波动, 影响系统在机电频带下的稳定性。

3) 避免强动态交互现象的参数设定建议是: 对于单个VSG接入小系统的情况, 可调整接入VSG的控制参数使得其开环模式远离系统中原有的机电振荡模式; 对于多VSG接入系统的情况, 应在复平面内合理安排VSG的模式位置, 避免VSG与VSG间开环模式的重合, 消除强交互带来的不利影响。

4) 当多个VSG接入系统后, 发生强交互现象

的概率将会上升, 针对虚拟同步发电机数量变化对电力系统机电振荡模式影响的定量分析有待于在日后工作中进一步深入探究, 是一项具有意义的挑战性工作。

参考文献

- [1] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.
Chen Xia, Lin Weixing, Sun Haishun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67(in Chinese).
- [2] 徐峥. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014(未找到本条参考文献, 请核对).
Xu Zheng. Flexible HVDC system[M]. Beijing: China Machine Press, 2014(in Chinese).
- [3] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Tang Guangfu. Voltage source converter based high voltage direct current transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010(in Chinese).
- [4] 王成山, 罗凤章, 张天宇, 等. 城市电网智能化关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2017-2027.
Wang Chengshan, Luo Fengzhang, Zhang Tianyu, et al. Review on key technologies of smart urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2017-2027(in Chinese).
- [5] 王炜宇, 李勇, 曹一家, 等. 基于虚拟调速器的 MTDC 虚拟同步机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017: 1-11.
WANG Weiyu, Li Yong, Cao Yijia, et al. The virtual synchronous generator technology based on virtual governor for MTDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017: 1-11(in Chinese).
- [6] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
Wang Lei, Zhang Chen, Li Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90(in Chinese).
- [7] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359.
Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Liu Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359(in Chinese).
- [8] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
Zhang Bo, Yan Xiangwu, Huang Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52(in Chinese).
- [9] 王金华. 虚拟同步发电机的同步频率谐振机理和阻尼抑制[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Wang Jinhua. Synchronous frequency resonance of virtual synchronous generators and damping control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(in Chinese).
- [10] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的 VSG 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1918-1927.
Xu Haizhen, Zhang Xing, Liu Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1927(in Chinese).
- [11] 李武华, 王金华, 杨贺雅, 等. 虚拟同步发电机的功率动态耦合机理及同步频率谐振抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 381-391.
Li Wuhua, Wang Jinhua, Yang Heya, et al. Power dynamic coupling mechanism and resonance suppression of synchronous frequency for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 381-391(in Chinese).
- [12] Liu Jia, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [13] Li Bin, Zhou Lin, Yu Xirui, et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(4): 462-470.
- [14] Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [15] Liu Jia, Miura Y, Bevrani H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [16] Xu Haizhen, Zhang Xing, Liu Fang, et al. A reactive power sharing strategy of VSG based on virtual capacitor algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7520-7531.
- [17] 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 strategy of micro grid converters with synchronous generator characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 261-268(in Chinese).
- [18] Hirase Y, Sugimoto K, Sakimoto K, et al. Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1287-1298.
- [19] Shintai T, Miura Y, Ise T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [20] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple vsg units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1462-1471.
- [21] Zhang Bo, Yan Xiangwu, Altahir S Y. Control design and small-signal modeling of multi-parallel virtual synchronous generators[C]//Proceedings of Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. Cadiz: IEEE, 2017: 471-476.
- [22] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-411.
- Shang Lei, Hu Jiabing, Yuan Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-411(in Chinese).
- [23] Wang Haifeng, Du Wenjuan. Analysis and damping control of power system low-frequency oscillations[M]. New York: Springer, 2016.
- [24] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Chen Shijie, Cao Yijia, Jiang Quanyuan. The theory and method of power system subsynchronous oscillations[M]. Beijing: Science Press, 2009(in Chinese).
- [25] Du Wenjuan, Bi Jingtian, Cao Jun, et al. A Method to examine the impact of grid connection of the DFIGs on power system electromechanical oscillation modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3775-3784.
-
- 

付强

收稿日期: 2017-11-07。

作者简介:

付强(1993), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统分析与控制, 1197348393@qq.com;

*通信作者: 杜文娟(1979), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制, ddwenjuan@qq.com;

王海风(1961), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制, hfwang60@qq.com。
- (编辑 邱丽萍)

Influence of Multi Virtual Synchronous Generators on Power System Electromechanical Oscillation Mode

FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng
(North China Electric Power University)

KEY WORDS: virtual synchronous generator (VSG); voltage source converter (VSC); damping torque analysis method; electromechanical oscillation

In recent years, the stability of AC system connected with a virtual synchronous generator (VSG) has been fully researched by frequency domain analysis, modal analysis and time domain simulation. However, the stability mechanism when multi-VSGs connected to an AC system lacks enough attention. This paper analyzes the influence of multi-VSGs on power system electromechanical oscillation mode and gives some suggestions for adjusting parameters of VSG control.

Firstly, the closed-loop linear model of AC system with multi-VSGs is established, as shown in Fig. 1 by combining the open-loop VSG control linear model as shown in (1) and the open-loop residual subsystem linear model is expressed as (2).

$$\begin{cases} \Delta P_1 = H_{vp}(s)\Delta V_1 + H_{\theta p}(s)\Delta \theta_1 \\ \Delta Q_1 = H_{vq}(s)\Delta V_1 + H_{\theta q}(s)\Delta \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta V_1 = G_{vp}(s)\Delta P_1 + G_{vq}(s)\Delta Q_1 \\ \Delta \theta_1 = G_{\theta p}(s)\Delta P_1 + G_{\theta q}(s)\Delta Q_1 \end{cases} \quad (2)$$

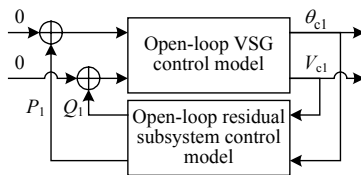


Fig. 1 Block diagram of transfer function of closed loop interconnected system

Based on the closed-loop interconnected model, it is found that when the open-loop modes of sub-systems are close to each other, one of the closed-loop modes may move to the right side of complex plane and leads to the instability of the system, which is explained as follows.

When $\lambda_{vsgj} = \lambda_{acj}$, λ_{vsgj} is one of the VSG control modes and λ_{acj} is one of the residual subsystem modes; the closed-loop modes $\hat{\lambda}_{vsgj}$ and $\hat{\lambda}_{acj}$ can be solved by interconnected linear model as:

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_{vsgj} = \lambda_{vsgj} + \Delta \lambda_{vsgj} \\ \hat{\lambda}_{acj} = \lambda_{acj} + \Delta \lambda_{acj} \end{cases} \quad (3)$$

where:

$$\begin{cases} \Delta \lambda_{acj} \approx \pm \sqrt{\frac{1}{k_{11}(\lambda_{acj}) + k_{22}(\lambda_{acj})}} = \pm k(\lambda_{acj}) \\ \Delta \lambda_{vsgj} \approx \pm \sqrt{\frac{1}{k_{11}(\lambda_{vsgj}) + k_{22}(\lambda_{vsgj})}} = \pm k(\lambda_{vsgj}) \end{cases}$$

From (3), it can be concluded that the closed-loop modes will be excluded and lead to worse damping when the open-loop AC subsystem mode and the open-loop VSG control mode are close to each other, which is called open-loop modal resonance. So, the parameters of VSG control should be adjusted carefully to avoid the open-loop modal resonance.

An AC system with three VSGs is carried out and parts of results are shown in Tab. 1 and Fig. 2. Tab.1 shows that, when the open-loop modes are close to each other, the closed-loop modes will be excluded, and one of the closed loop modes will be instable. By turning parameters of VSG control, the open-loop modes are far away from each other, so that the open-loop modal resonance will disappear. The time domain simulation result as shown in Fig.2 verifies the conclusions above.

Tab. 1 The open-loop and closed-loop oscillation model

Modes	VSG-2	VSG-3
Open-loop modes	$-0.420 + j6.010$	$-0.423 + j6.005$
Closed-loop modes	$-0.098 + j6.015$	$-0.945 + j6.002$

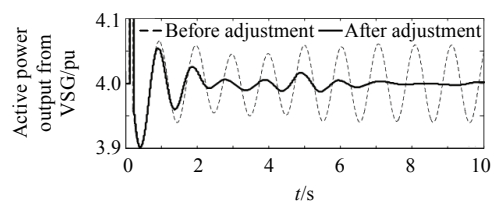


Fig. 2 Time domain simulation results