

虚拟同步发电机控制下多端交直流混联电力系统间的强动态交互过程及其传播

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)

Strong Dynamic Interaction and Propagation of Multi-terminal AC/DC Hybrid Power System with Virtual Synchronous Generator Control

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: Strong dynamic interaction and propagation of multi-terminal AC/DC hybrid power system with virtual synchronous generator control were analyzed in this paper. Firstly, the closed-loop interconnected linearization model of AC/DC hybrid power system which virtual synchronous generator (VSG) control subsystem taken as a feedback loop was established, the strong dynamic and its impact on stability of power system was researched and the stability criterion under strong dynamic was presented. Then, the propagation of strong dynamic, which is influenced significantly by droop control coefficient, was studied and concluded that the propagation path contains DC and AC lines. Based on the above analysis, the methods of avoiding the strong dynamic and improving the stability of hybrid power system were given as: break AC lines, use small droop control coefficient and set reasonable VSG control parameters. Finally, the time domain simulation and modal analysis were carried out and verified the above results based on a three terminal AC/DC hybrid power system with VSG.

KEY WORDS: virtual synchronous generator control; multi-terminal AC/DC hybrid power system; strong dynamic interaction; modal analysis

摘要: 该文针对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制下的多端交直流混联电力系统, 首先建立了 VSG 控制子系统作为反馈环节的交直流混联系统闭环线性化互联模型, 分析强动态交互过程的产生条件, 论证其对稳定性的负面影响, 提出混联电力系统在强动态交互过程下的稳定性判据。然后, 研究上述强动态交互过程的传播

路径, 得出 VSG 控制子系统与剩余子系统间强动态交互过程的传播路径包含直流线路和交流线路两部分, 其中直流系统的下垂控制参数会对强动态交互过程的传播产生显著影响。因此, 提出通过断开交流线路、采用较小的下垂系数来阻断、抑制强动态交互过程的传播, 并通过设定合理的 VSG 控制参数进一步破坏其产生的条件, 避免由于 VSG 接入引起的强动态交互过程及其对稳定性的潜在威胁, 提升 VSG 控制下多端交直流混联电力系统的稳定性。最后, 在 VSG 控制的三端交直流混联电力系统算例中, 采用模式分析法和时域仿真法验证上述分析结果。

关键词: 虚拟同步发电机控制; 多端交直流混联电力系统; 强动态交互过程; 模式分析法

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, 矢量控制的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。2017年12月, 世界首个具备虚拟同步机功能的新能源电站在国家风光储输示范电站建成投运^[12], 标志着虚拟同步机技术在工程应用领域的重大突破。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407068)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51407068).

VSG 接入对电力系统稳定性的影响研究主要经历 3 个阶段：第一个阶段是单个 VSG 接入对电力系统稳定性的影响。例如文献[13]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[14]针对 VSG 控制与发电机间产生的谐振现象，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[15]在原控制基础上提出一种新的阻尼控制方法，采用实验验证其能够有效提升低频振荡的稳定性。第二阶段是多个 VSG 接入对交流系统稳定性的影响。如文献[16]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[17]则采用模式分析法分析了不同的 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。随着并网 VSG 数量的增多，多个 VSG 组成 1 个多端直流系统将成为一种趋势，因此第三阶段是多端 VSG 系统接入对交流系统稳定性的影响。例如文献[18]指出传统 VSG 的控制策略难以响应直流系统注入功率的变化，会导致直流电压下降，提出具有有限幅环节的 VSG 直流电压下垂控制方式，实现 VSG 输出功率的动态调整，提升直流系统在功率波动时的稳定性。文献[19]则从物理机理的角度出发，设计基于虚拟调速器的 VSG 下垂控制策略，并采用模式分析法研究其对交流系统稳定性的影响，从时域仿真角度验证该控制方式能够有效提升交流系统的稳定性。

但是目前所研究的多端交直流混联电力系统仍较为简单，常对直流系统或者交流系统进行理想化的假设以降低分析难度，难以揭示 VSG 控制下多端交直流混联电力系统稳定性的内在机理，在研究深度和复杂度方面仍然面临挑战：

1) 相比于矢量控制方式，VSG 控制方式与系统间的动态交互过程更强，对系统稳定性的影响更大，更需引起关注。但是目前针对 VSG 控制下多端交直流混联电力系统稳定性的研究成果较少，缺乏分析 VSG 与多端直流系统间、VSG 与交流系统间动态交互过程的机理性分析方法，难以明确 VSG 接入后带来的潜在威胁。

2) 多端交直流混联电力系统是最为复杂的混联系统，VSG 与系统间的动态交互过程即可以通过交流网络进行传播，又可以通过直流网络进行传播，这将会扩大 VSG 对系统的影响范围。然而，现有文献的分析对象均较为简单，无法揭示 VSG

与系统间的动态交互过程在复杂系统中的传播机理，难以充分分析 VSG 接入对复杂电力系统稳定性带来的影响。

综上，本文针对 VSG 控制下的多端交直流混联电力系统，首先建立 VSG 控制子系统作为反馈环节的交直流混联系统闭环线性化互联模型，发现在特定条件下 VSG 与系统间的动态交互过程将变强，恶化系统的稳定性；然后分别研究了上述动态交互过程在直流系统中和交流系统中的传播路径，从优化参数和切断路径两方面给出能够降低上述强动态交互过程对系统稳定性不利影响的措施；最后通过对 VSG 控制下的三端交直流混联电力系统进行时域仿真和模式分析，验证上述分析结果。

1 VSG 控制下多端交直流混联电力系统的线性化互联模型

如图 1 所示为 VSG 控制下的 N 端交直流混联电力系统。 $V_{\text{vsg}i} \angle \theta_{\text{vsg}i}, i=1,2,\dots,N$ 为 VSG- i 输出的电压幅值及相角， $V_{\text{aci}} \angle \theta_{\text{aci}}, i=1,2,\dots,N$ 为 VSG- i 并网点处的电压幅值及相角， $X_i, i=1,2,\dots,N$ 为 VSG- i 与交流系统间的连接电抗， $P_i + jQ_i, i=1,2,\dots,N$ 为 VSG- i 输出的功率。以图 1 中虚线为分界线，可分别建立 VSG- N 控制子系统和剩余子系统的开环线性化模型，之后将其联立，可求得图 1 中闭环系统的线性化模型。不失一般性，本文以 VSG-1 为例进行研究，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。

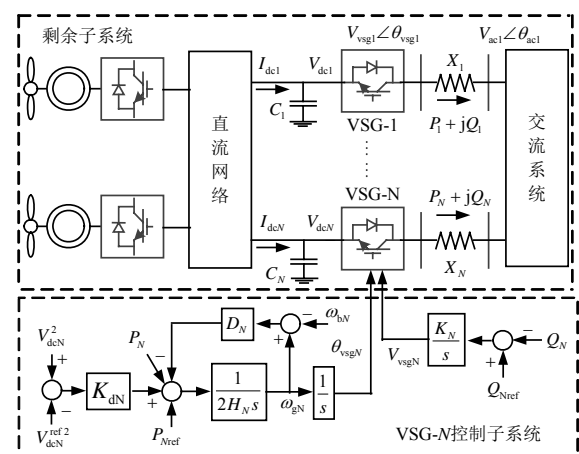


图 1 VSG 控制下的 N 端交直流混联电力系统

Fig. 1 N-terminal AC/DC hybrid power system with VSG control

1.1 VSG-1 控制子系统的开环线性化模型

VSG-1 的控制方式参考图 1 所示^[20]，其中 ω_{b1} 为电网基值频率， $P_{1\text{ref}}, Q_{1\text{ref}}$ 分别为 VSG-1 有功功

率和无功功率的设定值, H_1, D_1 分别为 VSG-1 的惯性常数与阻尼系数, K_1 为无功控制器的增益系数。 K_{d1} 是直流电压的下垂系数, V_{dc1} 是 VSG-1 直流电容 C_1 的直流电压, I_{dc1} 是直流侧电容 C_1 的注入电流。

由图 1 可得, 直流侧电压的动态方程为

$$C_1 V_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} = V_{dc1} I_{dc1} - P_1 \quad (1)$$

VSG-1 输出的电压幅值和相角可表示为

$$\begin{cases} \theta_{vsg1} = \frac{1}{2H_1 s^2 + D_1 s} [P_{1ref} + K_{dN}(V_{dcN}^2 - V_{dcN}^{ref2}) - P_1] \\ V_{vsg1} = \frac{K_1}{s} (Q_{1ref} - Q_1) \end{cases} \quad (2)$$

考虑 VSG-1 与交流系统的连接线路^[21], 有

$$\begin{cases} P_1 = \frac{V_{vsg1}^2 \sin 2\theta_{vsg1} + V_{vsg1} V_{ac1} \sin(\theta_{ac1} - \theta_{vsg1})}{X_1} \\ Q_1 = \frac{V_{vsg1} V_{ac1} \cos(\theta_{ac1} - \theta_{vsg1}) - V_{vsg1}^2 \cos 2\theta_{vsg1}}{X_1} \end{cases} \quad (3)$$

通过对式(1)–(3)进行线性化, 可建立 VSG-1 控制子系统的线性化模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_g}{dt} = A_g \Delta X_g + B_g \Delta u \\ \Delta y = C_g \Delta X_g + D_g \Delta u \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta u = [\Delta V_1 \ \Delta \theta_1 \ \Delta I_{dc1}]^T$ 为输入变量; $\Delta y = [\Delta P_1 \ \Delta Q_1 \ \Delta V_{dc1}]^T$ 为输出变量; $\Delta X_g = [\Delta \omega_{g1} \ \Delta \theta_{vsg1} \ \Delta V_{vsg1} \ \Delta V_{dc1}]^T$ 为状态变量, 矩阵 A_g 为 VSG-1 控制子系统的开环特征值矩阵, 对其求解可得 VSG-1 开环振荡模式为 λ_{vsg1} 。

依据式(4), 可得出 VSG-1 控制子系统的开环传递函数为

$$\Delta y = G(s) \Delta u \quad (5)$$

式中 $G(s) = C_g (sI - A_g)^{-1} B_g + D_g$ 。

至此, 建立以 $\Delta y = [\Delta P_1 \ \Delta Q_1 \ \Delta V_{dc1}]^T$ 为输出信号, 为 $\Delta u = [\Delta V_1 \ \Delta \theta_1 \ \Delta I_{dc1}]^T$ 输入信号的 VSG-1 控制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-1 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(6)所示, 其输入信号为 $\Delta y = [\Delta P_1 \ \Delta Q_1 \ \Delta V_{dc1}]^T$, 输出信号为 $\Delta u = [\Delta V_1 \ \Delta \theta_1 \ \Delta I_{dc1}]^T$ ^[22], 矩阵 A_a 为剩余子系统的开环特征值矩阵, 对其求解可得剩余子系统的开环振荡模式为 $\lambda_{si}, i=1,2,\dots,n$ 。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_a}{dt} = A_a \Delta X_a + B_a \Delta y \\ \Delta u = C_a \Delta X_a + D_a \Delta y \end{cases} \quad (6)$$

依据式(6), 可得出剩余子系统的开环传递函数为:

$$\Delta u = H(s) \Delta y \quad (7)$$

式中 $H(s) = C_a (sI - A_a)^{-1} B_a + D_a$ 。

至此, 建立以 $\Delta u = [\Delta V_1 \ \Delta \theta_1 \ \Delta I_{dc1}]^T$ 为输出信号, $\Delta y = [\Delta P_1 \ \Delta Q_1 \ \Delta V_{dc1}]^T$ 为输入信号的剩余子系统开环线性化模型。

1.3 VSG 控制下多端交直流混联电力系统的线性化互联模型

联立式(4)和(6), 可得 VSG 控制下多端交直流混联电力系统的闭环线性化状态空间矩阵为:

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A \Delta X, X = [X_g, X_a]^T \quad (8)$$

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, 包括 VSG 控制子系统的闭环模式 $\hat{\lambda}_{vsg1}$ 和剩余子系统的闭环模式 $\hat{\lambda}_{si}, i=1,2,\dots,n$ 。

同理, 可得出 VSG-1 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, 其中 $\Delta y, \Delta u$ 为 VSG-1 控制子系统和剩余子系统间的动态交互过程。

2 强动态交互过程的产生机理及其传播特性

2.1 强动态交互过程的产生条件及其对系统稳定性的影响

在图 2 的闭环互联系统中, 剩余子系统的开环振荡模式为矩阵 A_a 的特征值, $\lambda_{si}, i=1,2,\dots,n$, 并有 $H(\lambda_{si}) \rightarrow \infty$; VSG-1 控制子系统的开环振荡模式为 A_g 的特征值, λ_{vsg1} , 并有 $G(\lambda_{vsg1}) \rightarrow \infty$ 。当 $\lambda_{vsg1} = \lambda_{si}, i=1,2,\dots,n$ 时, 则有 $\Delta y = G(\lambda_{si}) \Delta u \rightarrow \infty$, 此时称子系统间产生了强动态交互过程, 将对闭环系统的稳

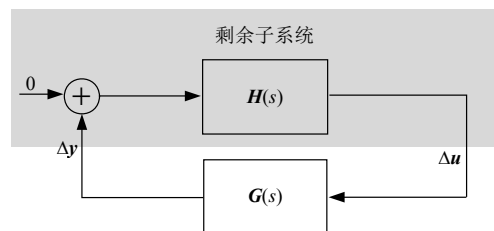


图 2 闭环互联系统传递函数框图

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

定性产生不利影响, 证明如下:

由图 2 可得 VSG-1 接入后闭环系统振荡模式 $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$, $\hat{\lambda}_{\text{si}}$ 的解为:

$$|I - G(s)H(s)| = 0 \quad (9)$$

考虑到 λ_{vsg1} 是 $G(s)$ 的开环振荡模式, λ_{si} , $i = 1, 2, \dots, n$ 是 $H(s)$ 的开环振荡模式, 则有式(10)成立。

$$G(s) = \frac{g(s)}{s - \lambda_{\text{vsg1}}}, H(s) = \frac{h(s)}{s - \lambda_{\text{si}}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 得

$$|(s - \lambda_{\text{vsg1}})(s - \lambda_{\text{si}})I - g(s)h(s)| = 0 \quad (11)$$

式(11)进一步展开为

$$[(s - \lambda_{\text{vsg1}})(s - \lambda_{\text{si}})]^3 + k_2(s)[(s - \lambda_{\text{vsg1}})(s - \lambda_{\text{si}})]^2 + k_1(s)[(s - \lambda_{\text{vsg1}})(s - \lambda_{\text{si}})] + k_0(s) = 0 \quad (12)$$

当 $\lambda_{\text{vsg1}} = \lambda_{\text{si}}$, 将 $s = \hat{\lambda}_{\text{vsg1}} = \lambda_{\text{vsg1}} + \Delta\lambda_{\text{vsg1}}$ 代入式(12), 可得

$$\Delta\lambda_{\text{vsg1}}^6 + k_2(s)\Delta\lambda_{\text{vsg1}}^4 + k_1(s)\Delta\lambda_{\text{vsg1}}^2 + k_0(s) = 0 \quad (13)$$

约去高次项, 可求得式(13)的近似解为

$$\Delta\lambda_{\text{vsg1}} \approx \pm \sqrt{-k_0(\lambda_{\text{vsg1}}) / k_1(\lambda_{\text{vsg1}})} \quad (14)$$

同理, 可得

$$\Delta\lambda_{\text{si}} \approx \pm \sqrt{-k_0(\lambda_{\text{si}}) / k_1(\lambda_{\text{si}})} \quad (15)$$

由式(14)和(15)可知, 子系统间的强动态交互过程会导致闭环系统的模式发生排斥, 当满足式(16)时, 闭环系统将会面临稳定性问题。

$$|\text{real}(\sqrt{\frac{-k_0(\lambda_{\text{si}})}{k_1(\lambda_{\text{si}})}})| > |\max[\text{real}(\lambda_{\text{si}}), \text{real}(\lambda_{\text{vsg1}})]| \quad (16)$$

2.2 强动态交互过程的传播及其影响因素

交流系统间的强动态交互过程是通过交流线路传播的, 主要与线路阻抗有关, 阻抗越大系统间的连接就越弱, 对强动态交互过程的削弱就越明显。特殊地, 如果阻抗趋于无穷大(断线), 则强动态交互过程不会传播^[23]。本文主要针对直流系统中强动态交互过程的传播路径进行推导, 并分析直流系统中影响强动态交互过程传播的影响因素。

考虑到直流输电网络的线路模型, 有

$$\begin{cases} P_j = V_{\text{dcj}}(-C_j \frac{dV_{\text{dcj}}}{dt} - I_{\text{dcj}}) \\ \frac{dI_{\text{dcj}}}{dt} = \sum_{i=1}^N y_{ji} V_{\text{dcj}}, j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)线性化可得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P \end{bmatrix} = W(s) \begin{bmatrix} \Delta V_{\text{dc1}} \\ \Delta V_{\text{dc}} \end{bmatrix} + U \begin{bmatrix} \Delta I_{\text{dc1}} \\ \Delta I_{\text{dc}} \end{bmatrix} \\ s \begin{bmatrix} \Delta I_{\text{dc1}} \\ \Delta I_{\text{dc}} \end{bmatrix} = Y(s) \begin{bmatrix} \Delta V_{\text{dc1}} \\ \Delta V_{\text{dc}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

其中 $Y(s)$ 是直流网络的导纳阵, 下角标 0 代表状态变量的稳态值。

$$\begin{cases} \Delta P = [\Delta P_2 \ \Delta P_3 \ \dots \ \Delta P_N]^T \\ \Delta V_{\text{dc}} = [\Delta V_{\text{dc2}} \ \Delta V_{\text{dc3}} \ \dots \ \Delta V_{\text{dcN}}]^T \\ \Delta I_{\text{dc}} = [\Delta I_{\text{dc2}} \ \Delta I_{\text{dc3}} \ \dots \ \Delta I_{\text{dcN}}]^T \\ W(s) = \begin{bmatrix} I_{\text{dc10}} + sC_1 V_{\text{dc10}} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & I_{\text{dcN0}} + sC_N V_{\text{dcN0}} \end{bmatrix} \\ U = \begin{bmatrix} V_{\text{dc10}} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & V_{\text{dcN0}} \end{bmatrix} \end{cases}$$

对式(18)求解, 可得

$$\Delta V_{\text{dc1}} = \sum_{i=1}^N f_{1i}(s) \Delta P_i \quad (19)$$

$f_{1i}(s) = M(s)_{1,i}$, 下角标 1, i 表示矩阵中第 1 行第 i 列的元素, $M(s)_{N \times N} = [W(s) + U(sI)^{-1}Y(s)]^{-1}$ 。

由式(19)可知, 多端直流系统中 VSG- i 交流侧的功率波动经过直流线路传播后, 到 VSG-1 侧后变为

$$\Delta P_1 = K_{d1} f_{1i}(s) \Delta P_i \quad (20)$$

可见, 直流系统对强动态交互过程传播的影响主要体现在两个方面, 一个是自身的系统参数 $f_{1i}(s)$, 另一个则是下垂控制参数 K_{d1} 。下垂控制参数越小, 直流系统对动态交互过程的削减作用越明显, 特殊地, 当下垂系数为 0 时, 直流系统将不会传播强动态交互过程。

3 案例验证

3.1 系统介绍

如图 3 所示是含有 3 端直流系统、4 台同步发电机的交直流混联电力系统, 其中发电机采用文献[21]的模型及其参数, VSG 采用文献[20]的模型及其参数。不失一般性, 案例以接入 VSG-1 为研究对象。

在 VSG-1 接入前, 依据系统的状态空间模型, 可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 中第 2 列所示。

对扰动后系统频率的波动曲线进行 FFT 分析,

如图4所示。可见其振荡频率与表1中的计算结果基本一致,验证了算例中状态空间模型的正确性。

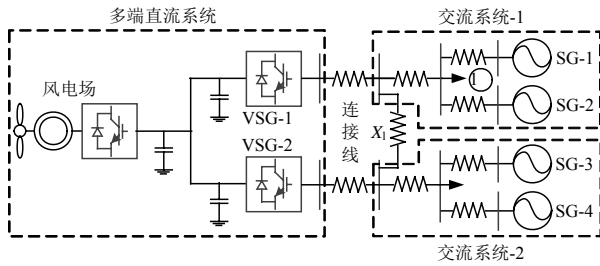


图3 VSG控制下的3端交直流混联系统

Fig. 3 Three terminal AC/DC hybrid system with VSG control

表1 图3系统中的开环振荡模式

Tab. 1 Open-loop oscillation modes in Fig. 3

开环模式	所属设备编号
$\lambda_{s1} = -0.21 + j5.78i$	SG-3
$\lambda_{s2} = -0.18 + j4.98i$	SG-1
$\lambda_{s3} = -0.21 + j4.08i$	VSG-2
$\lambda_{s4} = -0.23 + j3.18i$	SG-2

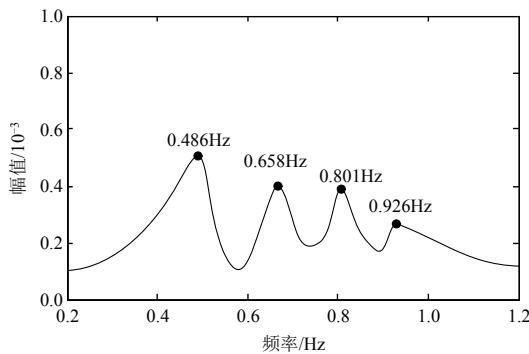


图4 频率波动曲线的FFT分析结果

Fig. 4 Analysis result of FFT of frequency curve

3.2 强动态交互过程的产生条件验证

由第2节的理论分析可知,当VSG-1的开环控制模式与剩余系统中的开环模式接近时,会产生强动态交互过程,威胁系统的稳定性,验证如下。如未说明,默认发电机的主要参数和VSG的控制参数如附录A所示。

沿图4中虚线调节VSG-1的控制参数,使VSG-1的开环控制模式 λ_{vsg1} 逐次接近表1中剩余系统的开环模式,此时混联系统对应的闭环根轨迹如图4中实线所示,图中箭头代表了根轨迹的移动方向。

由图5可知,当VSG-1的开环模式 λ_{vsg1} 与剩余系统中的开环模式(如图5中○所示)较远时,对应混联系统的闭环模式 $\hat{\lambda}_{vsg1}$, $\hat{\lambda}_{s1}$, $\hat{\lambda}_{s2}$, $\hat{\lambda}_{s3}$ 不会发生较大幅度的改变,近似有 $\hat{\lambda}_{vsg1} = \lambda_{vsg1}$, $\hat{\lambda}_{s1} = \lambda_{s1}$,

$\hat{\lambda}_{s2} = \lambda_{s2}$, $\hat{\lambda}_{s3} = \lambda_{s3}$ 。证明此时VSG-1和剩余系统间的动态交互较弱,VSG-1接入对混联系统稳定性的影响较小,例如 λ_{vsg1} 位于点a。但是当VSG-1的开环模式 λ_{vsg1} 与剩余系统中的开环模式较近时,对应混联系统的闭环模式将发生较大幅度的偏移,系统的稳定性将下降。例如 λ_{vsg1} 分别位于点b、c、d时,与剩余系统中的开环模式接近,系统中对应的闭环模式会发生较大排斥现象(如图5中●所示),导致闭环模式的阻尼降低甚至失稳。

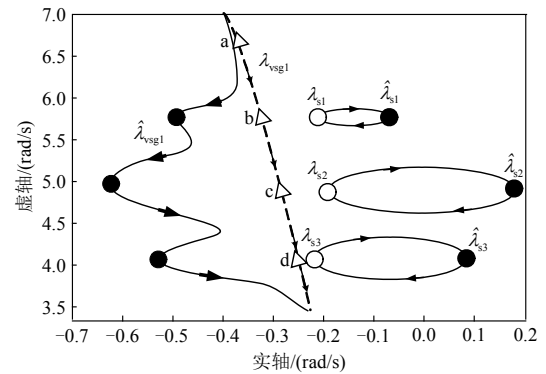


图5 交直流混联电力系统的开、闭环根轨迹

Fig. 5 Open-loop and closed-loop root locus of AC/DC hybrid power system

为了进一步验证上述结果是由于VSG-1与剩余系统间动态交互过程的强弱导致的,分别计算了 λ_{vsg1} 位于图5中点a、b、c、d时,闭环模式 $\hat{\lambda}_{vsg1}$ 的参与性,如图6所示。

由图6可知,当 λ_{vsg1} 位于点a时, $\hat{\lambda}_{vsg1}$ 中的参与性主要是VSG-1的状态变量,其余状态变量的参与性很低,证明了VSG-1没有和剩余子系统其它

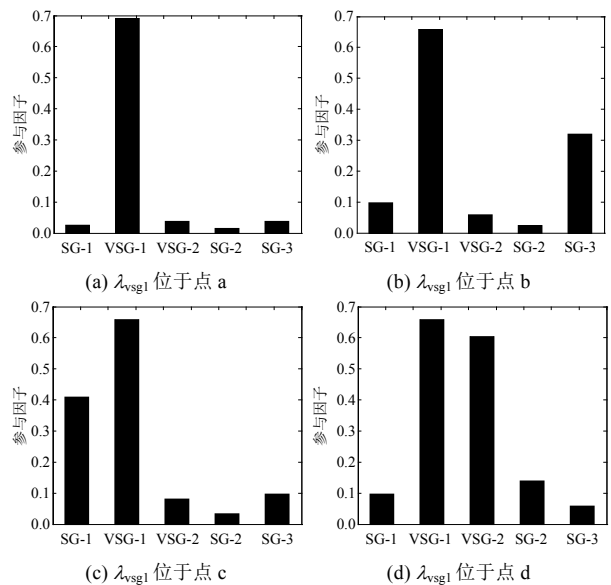


图6 λ_{vsg1} 在不同位置时 $\hat{\lambda}_{vsg1}$ 的参与性

Fig. 6 Participation of $\hat{\lambda}_{vsg1}$ with different λ_{vsg1}

设备发生强动态交互。而当 λ_{vsg1} 分别位于点 b、c、d 时, $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$ 中的参与性发生了重大变化, 不仅有 VSG-1 状态变量的参与, 还分别有 SG-3、SG-1、VSG-2 状态变量的参与, 证明当 VSG-1 的开环模式 λ_{vsg1} 与剩余子系统中开环模式接近时, 将与剩余子系统发生强动态交互。

综合图 5、6 可知, 当 VSG 控制子系统的开环模式与剩余系统的开环模式接近时, 子系统间将发生强动态交互, 导致混联系统的闭环模式相互排斥, 恶化系统稳定性。

3.3 强动态交互过程的传播路径研究

进一步分析 3.2 节的结果还可发现, λ_{vsg1} 不仅会与交流系统-1 中的发电机(SG-1)发生强动态交互现象, 还会与交流子系统 2 中的发电机(SG-3)、另一端换流站(VSG-2)发生强动态交互现象, 后者显然是因为直流系统和交流系统间的连接线起到了传播强动态交互过程的作用。为此, 将以图 5 为比照, 采用控制变量的分析原则, 分别分析直流系统和交流连接线在强动态交互过程传播中起到的作用, 揭示强动态交互过程的传播机理。

3.3.1 交流系统间连接线在强动态交互传播过程中的作用

由式(20)可知, 当直流系统的下垂系数为 0 时, 直流系统将不会传播强动态交互过程, 为此首先将 VSG-1 的下垂系数设定为 0, 保持其余参数不变, 重复 3.2 节的研究过程, 分析交流系统间连接线对强动态交互过程传播的影响, 如图 7 所示。

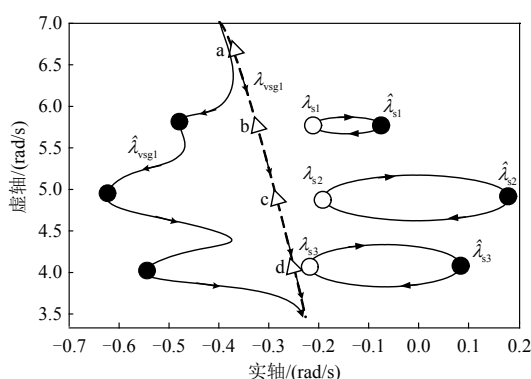


图 7 交直流混联电力系统的开、闭环根轨迹($K_{d1}=0$)

Fig. 7 Open-loop and closed-loop root locus of AC/DC hybrid power system ($K_{d1}=0$)

对比图 5 和图 7 可知, 在 VSG-1 的开环轨迹相同的情况下, 系统闭环模式的运动轨迹基本重合, 这说明交流系统线路在强动态交互过程传播中起主要作用。

3.3.2 直流系统在强动态交互传播过程中的作用

直流系统在强动态交互过程传播中的作用和其下垂参数的大小相关。断开图 3 交流系统 1-2 间的交流连接线路, 以 λ_{g1} 、 λ_{g3} 为例进行研究, 表 2 显示了当 λ_{vsg1} 分别接近 λ_{g1} 、 λ_{g3} 时, VSG-1 下垂系数 K_{d1} 对系统闭环模式及其强动态交互过程的影响。

表 2 K_{d1} 对系统闭环模式的影响

Tab. 2 Impact of K_{d1} on closed-loop oscillation modes

K_{d1}	$\hat{\lambda}_{g1}$ 的变化量 $ \Delta\lambda_{g1} $	$\hat{\lambda}_{g3}$ 变化量 $ \Delta\lambda_{g3} $
0.01	0.03	0.12
0.1	0.05	0.16
1	0.12	0.18

由表 2 可知, 当 λ_{vsg1} 分别接近 λ_{g1} 、 λ_{g3} 时, 随着下垂系数 K_{d1} 不断增大, 闭环系统模式的排斥幅值将不断增大, 证明直流系统的下垂系数会显著影响强动态交互过程的传播, 较小的下垂系数会起到抑制的作用, 进而避免混联系统的失稳。如图 8 所示, 当 λ_{vsg1} 接近 λ_{g1} , $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$ 中剩余系统状态变量的参与性也不断升高, 进一步验证上述分析结果。

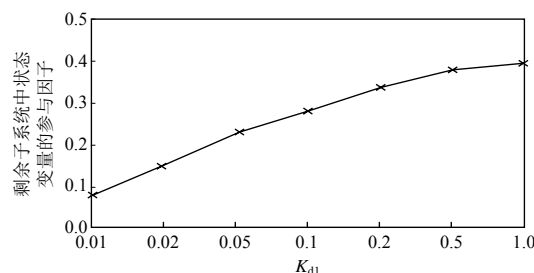


图 8 $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$ 中剩余系统状态变量的参与性随 K_{d1} 的变化曲线

Fig. 8 Participation of residual system state variables of $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$ with K_{d1} variation

特殊的, 当交流系统 1-2 间的连接线路断开且 $K_{d1}=0$, 则交流系统 1-2 间将不会传播动态交互过程, 如图 9 所示, 当 VSG-1 的开环模式 λ_{vsg1} 逐渐接近 λ_{g1} 、 λ_{g3} 时, 模式之间将不产生排斥作用, 闭环模式始终与开环模式相等, 在 $\hat{\lambda}_{\text{vsg1}}$ 的参与性中, SG-3 和 VSG-2 状态变量的参与性均为 0, 此时 2 个交流系统 1-2 间是动态解耦的。但是, 通过图 9 可以发现, 当 VSG-1 的开环模式 λ_{vsg1} 位于点 e 时, 与 SG-1 的开环模式 λ_{g2} 重合, 并再次产生了强动态交互作用, 这是因为 SG-1 和 VSG-1 仍然属于同一个交流系统, 所以之间的动态交互回路仍然存在, 当开环模式接近时, 满足了强动态交互过程的产生条件。

3.4 强动态交互过程的抑制措施

由 3.3 节的分析可知, 通过断开交流系统间的

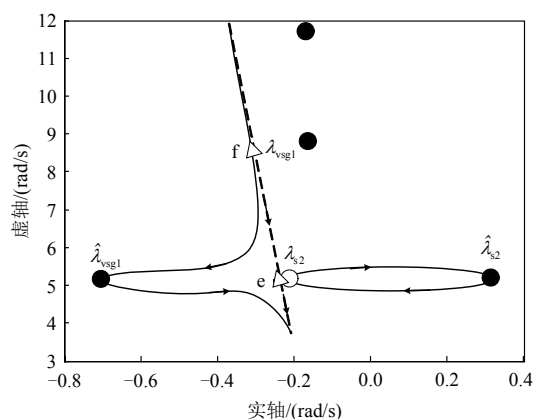


图9 交直流混联电力系统的开、闭环根轨迹($K_{d1}=0, X_L=\infty$)

Fig. 9 Open-loop and closed-loop root locus of AC/DC hybrid power system ($K_{d1}=0, X_L=\infty$)

连接线路,采用较小的下垂系数实现交直流系统互联,可以有效抑制、甚至阻止独立交流系统间动态交互的传播,避免了互联系统失稳。此外,对于处在同一互联系统中的多个子系统,可以通过调节参数避免强动态交互过程的发生。例如,针对图9中发生的强动态交互过程,可以通过调整参数的方式来进行避免。当VSG-1的开环模式 λ_{vsg1} 与系统中SG-1的开环模式 λ_{s2} 较远时(例如点f),则系统间的强动态交互过程不会发生,系统可以保持稳定。

最后,在MATLAB中采用时域仿真分析对以下3种工况进行验证,在0.1s于图3中负荷1处发生25%的负荷损失,并于0.2s恢复。工况1:VSG-1与VSG-2发生强交互,如图5点d所示;工况2:交流连接线断开,VSG-1与VSG-2发生强交互,如表2第2行第3列所示;工况3:交流连接线断开,直流系统下垂系数设定为0,并设定合适参数,强交互消失,如图9点f。

如图10工况1可知,VSG控制下的多端交直流混联电力系统确实会发生强动态交互的现象,并引发系统失稳。针对此,有效的解决措施是:1)切断强动态交互过程的传播路径(断开交流系统间的连接线路、减小直流系统的下垂系数),如工况2所示;2)设定合理的VSG控制参数,避免系统内部强动态交互现象的产生,如工况3所示,从而提升混联电力系统的稳定性。

4 结论

本文针对虚拟同步发电机控制下的多端交直流混联电力系统,研究了VSG控制子系统与剩余子系统间强动态交互过程的发生条件及其传播路径,得出以下结论。

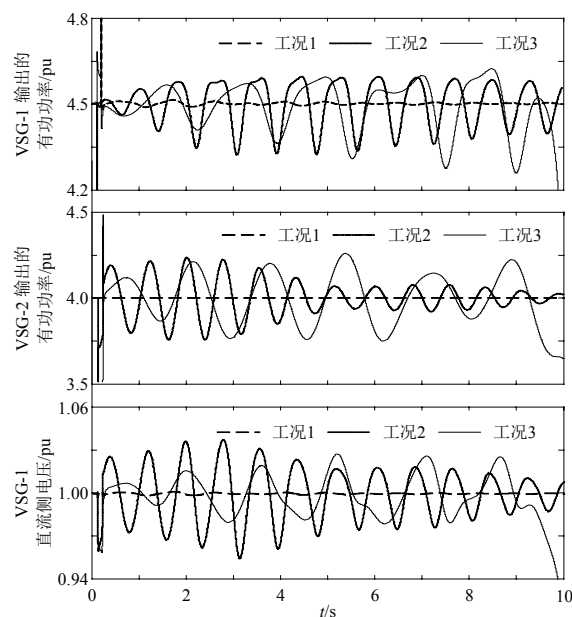


图10 时域仿真结果

Fig. 10 Time domain simulation results

1) VSG控制子系统与剩余子系统间产生强动态交互过程的条件是:VSG控制子系统的开环模式与剩余子系统开环模式重合,导致互联系统中闭环模式相互排斥,恶化系统稳定性。

2) 强动态交互过程的传播路径既有交流线路也有直流线路,其中直流通路路径和直流系统的下垂控制参数相关,较小的下垂系数可以抑制强动态交互过程的传播,进而降低系统失稳的风险。

3) 从3方面提出了提升VSG控制下交直流混联电力系统稳定性的措施:①在交流系统互联方面,应该尽可能采用VSG控制的直流系统连接两个独立交流系统从而代替交流线路连接;②在直流系统连接方面,应选择较小的下垂系数,以避免系统间强动态交互过程的发生;③在交流系统内部,应选择合理的VSG控制参数,避免VSG接入时与交流系统中已有的开环模式重合。

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. LCCMTDC 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.
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系统[M].北京:机械工业出版社,2014.

- 京: 中国电力出版社, 2010.
- Tang Guangfu. HVDC system based on voltage source converter[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] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
- Cheng Chong, Yang Huan, Zeng Zheng, et al. Roter inertia adaptive control method of VSG [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 82-89(in Chinese).
- [6] 王磊, 张琛, 李征, 等. 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): 349-360.
- 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): 349-360(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 Jinghua. Synchronous frequency resonance mechanism and damping suppression of virtual synchronous generator[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] 北极星电力网. 世界首个具备虚拟同步机功能的新能源电站建成投运. [EB/OL]. [2017-12-27]. <http://news.bjx.com.cn/html/20171227/870432-2.shtml>.
- [13] 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).
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Mei S, Zheng T, Chen L, et al. A comprehensive consensus-based distributed control strategy for grid-connected PV-VSG[C]//2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 2016, Chengdu, China.
- [17] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, PP(99): 1-1.
- [18] Zhang B, Yan X, Altahir S Y. Control design and small-signal modeling of multi-parallel virtual synchronous generators[C]//IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. IEEE, 2017: 471-476.
- [19] 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, 2018, 38(12): 3461-3470.
- 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,

2018, 38(12), 3461-3470(in Chinese).

[20] 郝新星. 基于虚拟同步机的微网逆变器控制策略及系统稳定性研究[D]. 合肥工业大学, 2015.

Hao Xinxing. Research on control strategy and system stability of micro-grid inverter based on virtual synchronous machine[D]. Hefei University of Technology, 2015(in Chinese).

[21] Wang Haifeng, Du Wenjuan. Analysis and damping control of power system low-frequency oscillations [M]. Springer, New York, USA, 2016.

[22] Kalcon G O, Adam G P, Anaya-Lara O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-Based DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.

[23] 张家安. 电力系统分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

Zhang Jiaan. Power system analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2013(in Chinese).

附录 A

表 A1 VSG 的主要参数

Tab. A1 Main parameters of VSGs

VSG	惯性时间常数/pu	阻尼系数/pu	下垂系数/pu
VSG-1	7	2.5	0.1
VSG-2	13.8	4.2	0.1

表 A2 发电机的主要参数

Tab. A2 Main parameters of SGs

内容	转子 惯性常数/s	阻尼 系数	转子时间 常数/s	励磁 时间常数
SG-1	80	30	10.2	0.06
SG-2	70	30	5.4	0.02
SG-3	62.8	30	7.3	0.02
SG-4	200	200	6.6	0.05



付强

收稿日期: 2018-01-09。

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;

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)

Strong Dynamic Interaction and Propagation of Multi-terminal AC/DC Hybrid Power System with Virtual Synchronous Generator Control

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

KEY WORDS: virtual synchronous generator control; multi-terminal AC/DC hybrid power system; strong dynamic interaction

Renewable power system has been developed rapidly in recent years. Based on that, the virtual synchronous generator (VSG) is concentrated by many researchers because it can increase the inertia of power system and provide the support to voltage and frequency.

Multi-terminal DC system with VSG will become a trend of development as the VSGs are used widely. However, related researches are still simple, the ideal DC or AC system is often used to reduce the difficulty of analysis, which is hard to reveal the internal mechanism of the stability of the multi-terminal AC/DC hybrid power system with VSG.

In order to solve the stability issues in a complex AC/DC hybrid power system with VSG, the linearization model is established firstly as follows.

The linearization model of VSG is in (1)

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_g}{dt} = A_g \Delta X_g + B_g \Delta u \\ \Delta y = C_g \Delta X_g + D_g \Delta u \end{cases} \quad (1)$$

Where

$$\begin{aligned} \Delta u &= [\Delta V_1 \quad \Delta \theta_1 \quad \Delta I_{dc1}]^T \\ \Delta y &= [\Delta P_1 \quad \Delta Q_1 \quad \Delta V_{dc1}]^T \\ \Delta X_g &= [\Delta \omega_{g1} \quad \Delta \theta_{svg1} \quad \Delta V_{svg1} \quad \Delta V_{dc1}]^T \end{aligned}$$

The linearization model of AC/DC hybrid power system except VSG is in (2)

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_a}{dt} = A_a \Delta X_a + B_a \Delta y \\ \Delta u = C_a \Delta X_a + D_a \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

According to (1)-(2), The linearization model of AC/DC hybrid power system with VSG is in (3)

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A \Delta X, X = [X_g, X_a]^T \quad (3)$$

Where A is the State space matrix of hybrid power system.

Secondly, the strong dynamic interaction between VSG and other system is found when one oscillation mode of X_g (λ_{vsg1} in Fig.1) is closed to another oscillation mode of X_a (λ_{si} , $i=1,2,3$ in Fig.1), which will lead modes

to repulse to each other and make the stability bad, which is show in Fig.1.

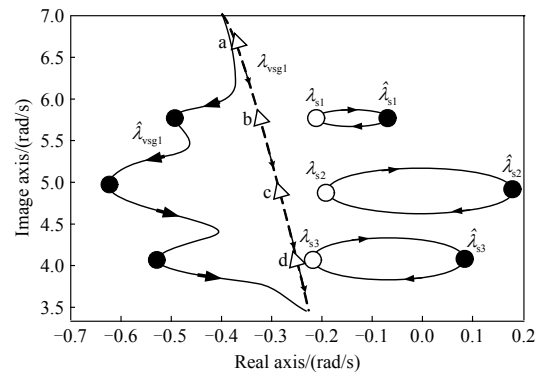


Fig. 1 Open-loop and closed-loop root locus of AC/DC hybrid power system

And then, the propagation of strong dynamic interaction is studied, concluded that the lines in AC and DC system can both propagate the strong dynamic interaction, and the lower droop coefficient in DC control system is, the more weak dynamic interaction will be, which is list in Tab.1.

Tab. 1 Impact of K_{d1} on closed-loop oscillation modes

K_{d1}	$ \Delta \lambda_{g1} $	$ \Delta \lambda_{g3} $
0.01	0.03	0.12
0.1	0.05	0.16
1	0.12	0.18

Finally, the three methods are proposed to reduce the strong dynamic interaction between VSG and the other system. 1. Disconnect the AC line so that an AC system can be divided into multiple sub-AC system; 2. Use the small droop coefficient in DC control system; 3. Set suitable parameters to avoid that one oscillation mode of X_g is closed to another oscillation mode of X_a . The simulation study is shown in Fig.2, which confirms the effectiveness of above methods.

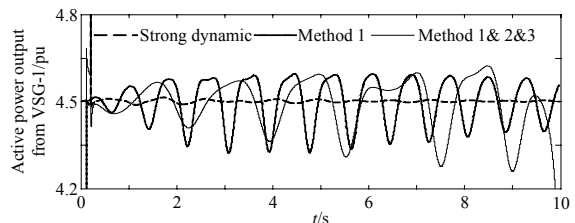


Fig. 2 Time domain simulation result