DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0092 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-13

构网型变流器并联系统暂态同步稳定性分析

柯强[1],舒思睿[2,3],汤世龙[3],胡经伟[1],田震[3],张校铭[1]

(1. 国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司,湖北 黄冈 438000; 2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院,湖北 武汉 430000; 3. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 在构网型变流器并联系统中,缺乏无功功率环的电压支撑作用会极大地影响变流器与电网的同步过程。因此,本文在无功功率环约束下对构网型变流器并联系统的暂态同步稳定性进行分析。首先,在无功功率环的电压约束下建立构网型变流器并联系统的暂态同步模型。然后,基于首次积分法得到所建模型的能量函数,在此基础上通过李雅普诺夫直接法得到较低保守性的吸引域,并给出相应的暂态同步相对稳定裕度评估指标。之后,分析无功环约束、参考有功功率、电网阻抗、无功环下垂系数、惯量、阻尼等参数对暂态同步稳定性的影响,可用于指导系统的参数优化设计方法。最后,通过MATLAB/Simulink仿真平台验证所提理论分析和参数优化设计方法的有效性。

关键词: 构网型变流器;能量函数;暂态同步稳定性;李雅普诺夫直接法

中图分类号: TM 714 **文献标志码:** A

Transient Synchronization Stability Analysis of Paralleled Converter Systems With Gird-Forming control

KE Qiang[1], SHU Sirui[2,3], TANG Shilong[3], HU Jingwei[1], TIAN Zhen[3], ZHANG Xiaoming[1]

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Wuhan University, Ministry of Education, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Co. Ltd Economic and Technological Research Institute, Wuhan 430000, China)

Abstract: In the paralleled converter systems with gird-forming control, the lack of the voltage support effect of the reactive power loop can greatly affect the synchronization process between the converter and the grid. Therefore, this paper analyses the transient synchronization stability of the paralleled converter systems with gird-forming control under the constraint of reactive power loop. Firstly, the transient synchronization model of the paralleled converter systems with gird-forming control is built under the voltage constraint of the reactive power loop. Then, the energy function of the constructed model is obtained based on the first-time integration method, based on which the domain of attraction is estimated by the Lyapunov direct method, and the corresponding transient synchronous stability margin assessment index is given. After that, the influence of reactive loop constraint, reference active power, grid impedance, reactive loop droop coefficient, inertia,

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 柯强(1983-),男,高级工程师,主要从事电力系统规划设计,E-mail:164204145@qq.com。

通信作者: 田震(1991-),男,副研究员,主要从事电力电子化电力系统建模、控制和稳定性分析研究,E-mail: ztian.ee@whu.edu.cn。

基金项目: 国网湖北省电力有限公司科技项目(编号:SGHBHG00JYJS2311207)。

本文引用格式: 柯强,舒思睿,汤世龙,等.构网型变流器并联系统暂态同步稳定性分析[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-13.

Citation: KE Qiang, SHU Sirui, TANG Shilong, et al. Transient Synchronization Stability Analysis of Paralleled Converter Systems With Gird-Forming control[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-13.

damping and other parameters on the transient synchronization stability is analysed, which can be used to guide the parameter optimization design method of the system. Finally, the effectiveness of the proposed theoretical analysis and parameter optimization design method is verified by MATLAB/Simulink simulation platform.

Key words: grid-forming converter; energy function; transient synchronization stability; Lyapunov direct method

“双碳”目标倒逼我国能源转型,风、光为代表的可再生能源通过电力电子装置大规模接入电网。传统同步发电机为主导的电力系统逐步向高比例新能源及电力电子的“双高”电力系统转变[1-3]。然而,然而,目前大量变流器是由锁相环实现同步的跟网型变流器,由于锁相环自身的非线性特性,跟网型变流器在弱电网下易发生暂态同步稳定问题[5-7]。针对上述问题,以虚拟同步发电机(virtual synchronous generator,VSG)为控制策略的构网型变流器(grid-foming voltage-source converters,GFM-VSC)因其在弱电网或孤岛情况下出色的稳定运行能力而受到广泛关注[8-10]。

VSG通过模拟同步机的惯量和阻尼特性使并网变流器具备传统同步机的运行特性,进而实现对电网频率和电压支撑,从而提升并网系统的稳定运行能力[11]。然而,不同于传统同步机,构网控制中的有功环和无功环的时间尺度接近,二者之间存在功率耦合现象,这种现象会影响控制性能,甚至导致系统的暂态不稳定[12-13]。单台构网型变流器的暂态稳定问题已得到大量的研究。前期的一些研究将构网型变流器当作具有强励磁系统的同步机来分析其暂态稳定性,认为无功环为恒电压输出,仅考虑有功环摇摆方程的二阶动态。在此基础上,文献[14-15]利用等面积法则和能量函数等方法来研究构网型变流器的暂态同步稳定问题,但变流器的器件过流能力有限,难以承受此假设带来的故障冲击电流。为了进一步考虑功率耦合带来的影响,一些研究设置无功环较高的带宽,暂态期间无功控制回路会快速达到稳态,将无功环状态方程转化为以功角为自变量的准稳态方程。在此假设基础上,文献[16-18]分别利用能量函数、相位图以及分叉理论研究了构网型变流器的暂态同步稳定问题。文献[19]则更深入地考虑了无功环的电压动态变化并解释了功率耦合对构网型变流器暂态行为的影响。文献[20]通过数值计算研究了计及无功环动态的构网型变流器暂态稳定性,分析结果比仅考虑无功环稳态约束更加准确

在新能源场站中,成百上千的发电装备构成新能源并网系统[21],其控制与交互情况也不尽相同[22]。不同于单台变流器的稳定性问题,研究多机稳定性问题时更需要考虑机组间的交互,这无疑会使暂态稳定分析变得更加困难。所以当前构网型变流器并联系统的稳定性研究并不多见且大多都基于小信号模型。文献[23]针对构网型变流器并联系统,推导系统并联小信号模型,分析了参数对系统的影响规律,提出惯量匹配控制策略以提高系统频率稳定性能,但其分析过程中认为2台构网型变流器参数相同且按相同规律变化,这种情况下变流器之间不存在功率交互作用,导致结论不具有普遍性。文献[24]提出一种参数自调节优化控制策略以抑制有功功率振荡和频率波动。文献[25]基于小信号模型,结合系统特征根主导状态变量的参与因子运动轨迹详细地分析了系统参数等因素对VSG本体、VSG与VSG之间以及VSG与电网之间的频率影响规律。文献[26]建立考虑控制时延的构网型变流器并联系统小信号模型,并使用小状态空间法分析孤岛情况下不同控制参数对其稳定性的影响机理。

简而言之,现有的构网型变流器并联系统稳定性分析方法单一且没有考虑无功环的电压支撑作用对系统暂态稳定性的影响。面对以上问题,本文考虑无功环电压方程组的约束,建立系统能量函数模型,从而可以研究系统参数变化系统暂态同步稳定性的影响。

本文首先在无功环电压约束下建立构网型变流器并联系统的非线性降阶模型并推导变流器的输出功率。然后,基于首次积分法得到所建立模型的能量函数,在此基础上通过李雅普诺夫直接法估计其吸引域,并给出相应的暂态同步稳定裕度评估指标。之后,分析有功功率、电网阻抗、无功环下垂系数、惯量及阻尼等参数对稳定性的影响,可用于指导系统的参数优化设计方法。最后,通过MATLAB/Simulink仿真平台验证所提理论分析和参数优化设计方法的有效性。

1 构网变流器并联系统的模型建立

1.1 系统描述

构网型变流器并联系统拓扑结构如图1所示。图1中U_{dc}为直流侧电压,本文不考虑U_{dc}的动态过程,U_{dc}为恒定值。L_{fi}和C_{fi}分别为变流器端口滤波器的电感和电容。I_i为变流器输出电流。U_i为变流器输出电压幅值,θ_i变流器输出电压相角。U_g为电网电压幅值,θ_g电网电压相角。Z_{linei}为线路阻抗,由于线路电感远大于线路电阻,本文视线路阻抗为纯电抗X_i。同理,视电网阻抗Z_g为纯电抗X_g。以电网电压相角θ_g为参考,定义两台变流器输出电压功角为

$$\begin{cases}\delta_1=\theta_1-\theta_g=\int(\omega_1-\omega_0)dt\\ \delta_2=\theta_2-\theta_g=\int(\omega_2-\omega_0)dt\end{cases}\tag{1}$$

式中:ω_0为系统额定角频率,通常为314rad/s;ω_1和ω_2分别为两个变流器的输出角频率。

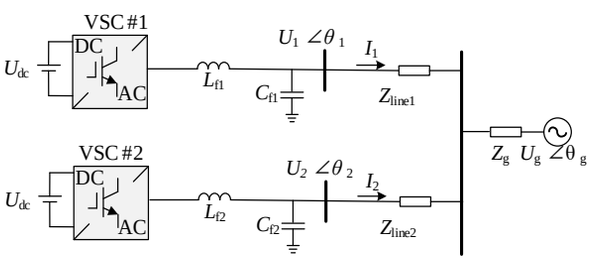


图1 构网变流器并联系统拓扑图

Fig.1 Topology of paralleled converter systems with gird-forming control

图2展示了各个变流器的控制结构。J_i代表VSC #i的虚拟惯量;D_{pi}代表VSC #i有功环的虚拟阻尼;D_{qi}代表VSC #i无功环的下垂系数;K_{pi}代表VSC#i的电压积分系数;P_{refi}代表VSC #i的参考有功功率;Q_{refi}代表VSC #i的参考无功功率;P_i和Q_i分别代表VSC#i的输出有功功率和无功功率;由于电压电流内环动作时间远快于功率外环,在分析外环控制引发的暂态稳定问题时,内环控制可以看作跟踪外环参考值的理想单位增益。根据控制结构,其有功环和无功环微分方程分别如式(2)和(3):

$$J_i\frac{d\delta_i^{\ 2}}{dt^2}=P_{refi}-P_i-D_p\dot{\delta}_i\tag{2}$$

$$K_{pi}\dot{U}_i=(Q_{refi}-Q_i)+D_{qi}(U_i-U_0)\tag{3}$$

1.2 系统输出功率推导

虚拟同步控制的构网型变流器可以作为电压源,因此可以将图1中的两构网变流器并网系统简

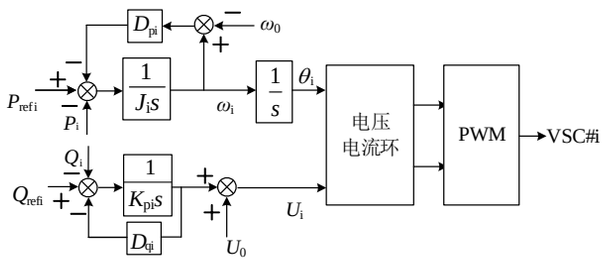


图2 构网控制结构

Fig. 2 Structure for grid-forming control

化为如图3所示的等值电路。

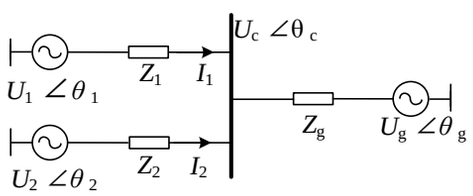


图3 简化系统拓扑

Fig. 3 Simplified topology of paralleled converter systems with gird-forming control

根据节点电压定理,公共点电压、等效电压源以及电网电压之间的关系可以用下式表示,

$$\left(\frac{1}{jX_1}+\frac{1}{jX_2}+\frac{1}{jX_g}\right)U_c\angle\theta_c=\frac{U_1\angle\theta_1}{jX_1}+\frac{U_2\angle\theta_2}{jX_2}+\frac{U_g\angle\theta_g}{jX_g}\tag{4}$$

其中U_c和θ_c为公共点电压幅值和角度;X_1为VSC#1的线路电抗;X_2为VSC#2的线路电抗;X_g电网电抗。

根据(4),公共点电压和幅值可以被表示为:

$$U_c\angle\theta_c=\frac{X_2X_gU_1\angle\theta_1}{B}+\frac{X_1X_gU_2\angle\theta_2}{B}+\frac{X_1X_2U_g\angle\theta_g}{B}\tag{5}$$

其中$B=X_1X_2+X_2X_g+X_1X_g$。

变流器的输出电流矢量可以分别被表示为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_1=\dfrac{U_1\angle\theta_1-U_c\angle\theta_c}{jX_1}\\ \boldsymbol{I}_2=\dfrac{U_2\angle\theta_2-U_c\angle\theta_c}{jX_2}\end{cases}\tag{6}$$

系统的输出复功率可以表示为:

$$\begin{cases}S_1=P_1+jQ_1=1.5U_c\boldsymbol{I}_1^{\ *}\\ S_2=P_2+jQ_2=1.5U_c\boldsymbol{I}_2^{\ *}\end{cases}\tag{7}$$

其中$\boldsymbol{U}_c$代表公共点电压矢量;$\boldsymbol{I}_1^{\ *}$代表VSC#1输出电流矢量的共轭;$\boldsymbol{I}_2^{\ *}$代表VSC#2输出电流矢量的

共轭。

根据(5)-(7),进一步可推导VSC#1和VSC#2的输出有功功率分别为:

$$\begin{cases} P_1 = P_{e1}\sin(\delta_1) + P_{inter}\sin(\delta_1 - \delta_2) \\ P_2 = P_{e2}\sin(\delta_2) + P_{inter}\sin(\delta_2 - \delta_1) \end{cases} \tag{8}$$

其中$P_{e1}\sin(\delta_1)$表示VSC#1向电网输送的有功功率;$P_{e2}\sin(\delta_2)$表示VSC#2向电网输送的有功功率;$P_{inter}\sin(\delta_1\text{-}\delta_2)$和$P_{inter}\sin(\delta_2\text{-}\delta_1)$表示VSC#1和VSC#2之间的交互有功功率。具体表达式可以写作:

$$\begin{cases} P_{e1} = \dfrac{1.5X_2U_1U_g}{B} \\ P_{e2} = \dfrac{1.5X_1U_2U_g}{B} \\ P_{inter} = \dfrac{1.5X_gU_1U_2}{B} \end{cases} \tag{9}$$

根据(5)-(7),进一步可推导VSC#1和VSC#2的输出无功功率分别为

$$\begin{cases} Q_1 = Q_{11} - Q_{12}\cos(\delta_1) - Q_{inter}\cos(\delta_1 - \delta_2) \\ Q_2 = Q_{21} - Q_{22}\cos(\delta_2) - Q_{inter}\cos(\delta_2 - \delta_1) \end{cases} \tag{10}$$

其中$Q_{11}\text{-}Q_{12}\cos(\delta_1)$表示VSC#1向电网输送的无功功率;$Q_{21}\text{-}Q_{22}\cos(\delta_2)$表示VSC#2向电网输送的无功功率;$Q_{inter}\cos(\delta_1\text{-}\delta_2)$和$Q_{inter}\cos(\delta_2\text{-}\delta_1)$表示VSC#1和VSC#2之间的交互无功功率。具体表达式可以写作:

$$\begin{cases} Q_{11} = \dfrac{1.5(X_2 + X_g)U_1^{\,2}}{B} \\ Q_{12} = \dfrac{1.5X_2U_1U_g}{B} \\ Q_{21} = \dfrac{1.5(X_1 + X_g)U_2^{\,2}}{B} \\ Q_{22} = \dfrac{1.5X_1U_2U_g}{B} \\ Q_{inter} = \dfrac{1.5X_gU_1U_2}{B} \end{cases} \tag{11}$$

1.3 功率耦合的影响

通常情况下,构网性变流器并联系统的暂态同步稳定性取决于功角δ_1和δ_2在大扰动下的动态响应。如果扰动消失后,功角δ_1和δ_2能恢复到初始值,那么系统则是稳定的。如果δ_1和δ_2出现不间断的振荡或发散到无穷大,恢复不到初始值,那么系统是不稳定的。

为了分析功角δ_1和δ_2在故障情况下的动态特性,将式(8)代入式(2)可以得到功角δ_1和δ_2二阶微分方程组:

$$\begin{cases} J_1\ddot{\delta}_1 = P_{ref1} - P_{e1}\sin(\delta_1) - P_{inter}\sin(\delta_1 - \delta_2) - D_1\dot{\delta}_1 \\ J_2\ddot{\delta}_2 = P_{ref2} - P_{e2}\sin(\delta_2) - P_{inter}\sin(\delta_2 - \delta_1) - D_2\dot{\delta}_2 \end{cases} \tag{12}$$

可见,(12)中的功角δ_1和δ_2的变化同时受到无功功率输出U_1和U_2的影响,即有功功率回路与无功功率回路之间存在耦合。为了准确刻画δ_1和δ_2的动态过程,必须考虑无功环的耦合影响。在暂态过程中,无功控制回路会快速达到稳态[16],两台逆变器的输出电压U_1和U_2在(3)中的动态方程可以转化为稳态方程,即U_1和U_2可以作为参数变量而不是状态变量。将(10)代入(3)并将$dU_1/\mathrm{d}t$和$dU_2/\mathrm{d}t$视为0,可以得到无功环代数约束方程组:

$$\begin{cases} U_1 = U_0 + \dfrac{(Q_{ref1} - Q_1)}{D_{q1}} \\ U_2 = U_0 + \dfrac{(Q_{ref2} - Q_2)}{D_{q2}} \end{cases} \tag{13}$$

为了更直观地说明无功环对系统的暂态稳定性的影响,以电网电压为参考,可以建立如图4(b)所示的考虑无功环的等效电路。图4(a)绘制了不考虑无功环的等值电路,可将无功环的输出电压为恒定电压U_1和U_2不受功角δ_1和δ_2变化的影响,且功角δ_1和δ_2只由有功环控制。

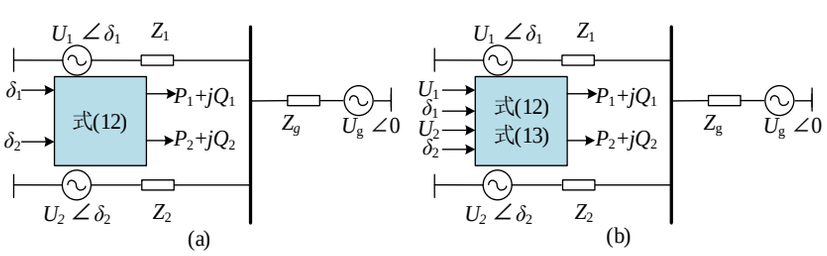


图4 并网示意图,(a)不考虑无功环,(b)考虑无功环

Fig. 4 Equivalent circuit of a VSG connected to power grid , (a) without

注:considering reactive power control, (b) considering reactive power control.

2 能量函数建立及暂态稳定分析

2.1 能量函数的建立

式(12)和(13)构成的二元二阶非线性方程组难以求得δ_1和δ_2的解析解。为了评估构网型变流器并联系统的暂态同步稳定性，根据首次积分法推导了一种考虑变流器之间有功功率交互的能量函数，包含四个状态变量δ_1、δ_2、ω_1、ω_2，具体推导过程如下：

忽略式(12)的系统阻尼，并在等式两边分别同时乘以$\mathrm{d}\delta_1/\mathrm{dt}$，$\mathrm{d}\delta_2/\mathrm{dt}$：

$$\begin{cases} J_1\ddot{\delta}_1\dfrac{d\delta_1}{dt}=(P_{\mathrm{ref}1}-P_{\mathrm{e}1}\sin(\delta_1)-P_{\mathrm{inter}}\sin(\delta_1-\delta_2))\dfrac{d\delta_1}{dt} \\ J_2\ddot{\delta}_2\dfrac{d\delta_2}{dt}=(P_{\mathrm{ref}2}-P_{\mathrm{e}1}\sin(\delta_2)-P_{\mathrm{inter}}\sin(\delta_2-\delta_1))\dfrac{d\delta_2}{dt} \end{cases} \tag{14}$$

对式(14)进行积分：

$$\begin{cases} \displaystyle\int_{\delta 0}^{\delta 1}J_1\dot{\delta}_1 d\dot{\delta}_1=\int_{\delta 0}^{\delta 1}(P_{\mathrm{ref}1}-P_{\mathrm{e}1}\sin(\delta_1)-P_{\mathrm{inter}}\sin(\delta_1-\delta_2))d\delta_1 \\ \displaystyle\int_{\delta 0}^{\delta 2}J_2\dot{\delta}_2 d\dot{\delta}_2=\int_{\delta 0}^{\delta 2}(P_{\mathrm{ref}2}-P_{\mathrm{e}2}\sin(\delta_2)-P_{\mathrm{inter}}\sin(\delta_2-\delta_1))d\delta_2 \end{cases} \tag{15}$$

根据式(15)积分结果，定义系统的动能$E_{\mathrm{k}1}$、$E_{\mathrm{k}2}$，势能$E_{\mathrm{p}1}$、$E_{\mathrm{p}2}$以及交互项能量E_{inter}分别为

$$\begin{aligned} &E_{\mathrm{k}1}=\frac{1}{2}J_1(\omega_1-\omega_0)^2, E_{\mathrm{p}1}=-P_{\mathrm{ref}1}\delta_1-P_{\mathrm{e}1}\cos\delta_1, \\ &E_{\mathrm{k}2}=\frac{1}{2}J_2(\omega_2-\omega_0)^2, E_{\mathrm{p}2}=-P_{\mathrm{ref}2}\delta_2-P_{\mathrm{e}2}\cos\delta_2, \\ &E_{\mathrm{inter}}=-P_{\mathrm{inter}}\cos(\delta_2-\delta_1) \end{aligned} \tag{16}$$

因此，构网型变流器并联系统的总能量为两台变流器动能和势能之和以及交互项能量，其能量函数可以表示为：

$$\begin{aligned} V(\delta_1,\delta_2,\omega_1,\omega_2)=&-P_{\mathrm{ref}1}\delta_1-P_{1\,1}\cos\delta_1+\\ &\frac{1}{2}J_1(\omega_1-\omega_0)^2-P_{\mathrm{ref}1}\delta_2-P_{2\,1}\cos\delta_2+\\ &\frac{1}{2}J_2(\omega_2-\omega_0)^2-P_{\mathrm{inter}}\cos(\delta_2-\delta_1)+\alpha \end{aligned} \tag{17}$$

其中α为常数。基于式(1)、(12)和(17)，能量函数$V(\delta_1,\delta_2,\omega_1,\omega_2)$的微分，即系统阻尼，可推导为：

$$\begin{aligned} \dot{V}(\delta_1,\delta_2,\omega_1,\omega_2)=&\frac{\partial V}{\partial\delta_1}\dot{\delta}_1+\frac{\partial V}{\partial\delta_2}\dot{\delta}_2+\frac{\partial V}{\partial\omega_1}\dot{\omega}_1+\frac{\partial V}{\partial\omega_2}\dot{\omega}_2\\ =&-P_{\mathrm{ref}1}\dot{\delta}_1+P_{\mathrm{e}1}\sin\delta_1\dot{\delta}_1+J_1\dot{\delta}_1\dot{\omega}_1+P_{\mathrm{inter}}\sin(\delta_1-\delta_2)\dot{\delta}_1-P_{\mathrm{ref}2}\dot{\delta}_2+P_{\mathrm{e}2}\sin\delta_2\dot{\delta}_2\\ &+J_2\dot{\delta}_2\dot{\omega}_2+P_{\mathrm{inter}}\sin(\delta_2-\delta_1)\dot{\delta}_2\\ =&-D_1\dot{\delta}_1{}^2-D_2\dot{\delta}_1{}^2 \end{aligned} \tag{18}$$

值得注意的是，式(18)的系统阻尼全局为正，即在有功功率交互下的构网型变流器并联系统依然为一个耗散能量系统。基于(17)和(18)的能量函数$V(\delta_1,\delta_2,\omega_1,\omega_2)$的考虑了两台变流器的功角及功角的导数，从而可以通过评估系统整体的暂态行为解析变流器参数变化对系统的稳定性的影响机制。

2.2 暂态稳定性分析

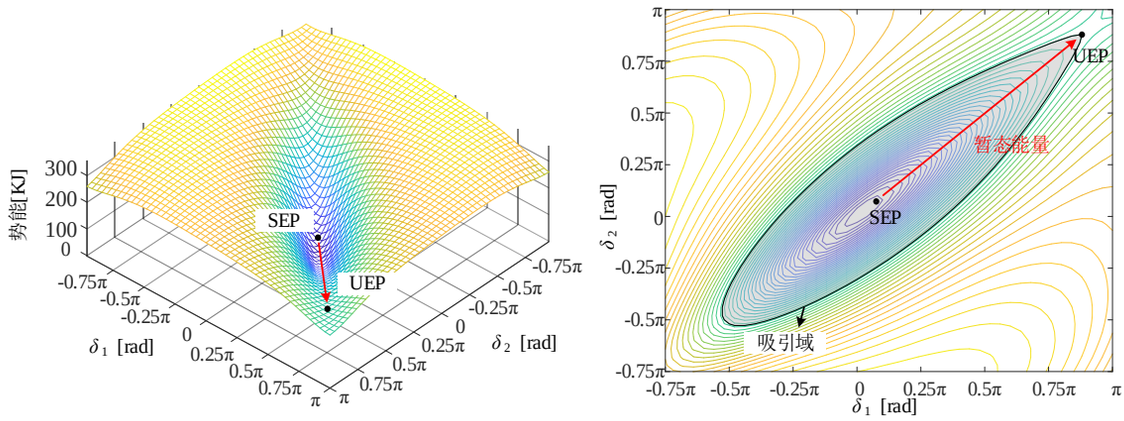
在暂态过程中，变流器的势能和交互项能量远大于动能，所以在刻画系统暂态行为时可以忽略动能。当两台VSC的动能为0时，即ω_1和ω_2均等于ω_0。系统的三维势能分布图如图5(a)所示。为了更加直观，将图5(a)转化为图5(b)所示的势能等势面图。联立式(8)-(13)可以求出稳定平衡点(stable equilibrium point，SEP)和不稳定平衡点(unstable equilibrium point，UEP)。

根据式(17)和(18)的能量函数可知，构网型变流器并联系统的阻尼全局为正。因此，只包含SEP的最大封闭等势面可作为吸引域的估计。系统的临界能量位于UEP，所以临界能量对应的灰色势能面则可以作为吸引域的估计，如图5(b)灰色区域所示。

根据Lyapunov理论，SEP为吸引域内的能量最低点，当系统受到扰动后从吸引区域(灰色区域)内的任何一点开始进入暂态过程，系统最终将回到平衡点。定义构网型变流器两机并联系统的相对暂态稳定裕度η：

$$\eta=\frac{V_{\mathrm{UEP}}-V_{\mathrm{SEP}}}{V_{\mathrm{SEP}}} \tag{19}$$

为了验证所刻画吸引域的保守性，对暂态过程中所有可能的系统状态进行数值计算，得出系统的实际吸引域范围如图6所示，本文估计的吸引域位于实际吸引域内部。由于考虑了无功环代数约束方程组，刻画的吸引域保守性较低，具有一定的优



(a)三维势能分布图　　(b)势能等势面

图5　系统势能分布图

Fig. 5　Potential energy distribution of system

越性。

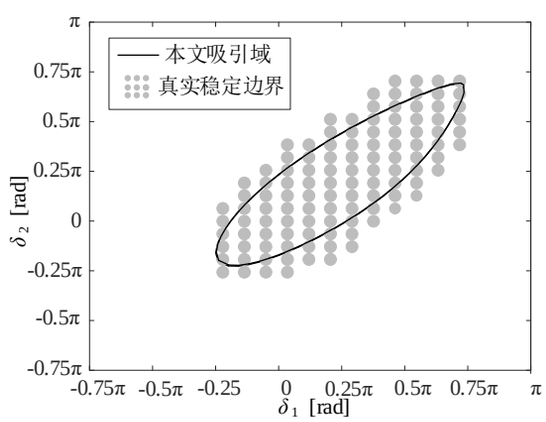


图6　与稳定边界的比较

Fig. 6　Comparison of real stability boundary.

3　参数变化对系统暂态稳定性的影响

3.1　无环控制回路对系统稳定性的影响

图7(a)为考虑无功环和不考虑无功环约束的吸引域变化图,可见两个吸引域发生了交叉现象。然而在暂态过程中,功角一般是在大于零的范围内变化,即系统的状态在吸引域的右上方区域。所以可以通过吸引域右上方区域的变化来判断系统的暂态稳定性。图7(a)中不考虑无功环的影响时的系统吸引域(蓝线)是大于考虑无功环时的吸引域(红色)。在相同故障条件下,当故障切除时,如果系统状态位于红色吸引域外蓝色吸引域内,考虑无功环是暂态不稳定的,不考虑无功环是暂态稳定的,即导致了系统暂态稳定性的误判,这在判断系统暂态稳定性时是不允许的。因此,在判断构网型变流器并联系统的暂态稳定性时,必须考虑无功环的影响,以得到准确性较强的吸引域范围。

3.2　参考有功功率变化对系统稳定性的影响

在单台网变流器并网系统中,发生功角不稳定最主要的原因是系统输出有功功率和参考有功功率不平衡,为了保证暂态稳定性,通常不宜选取过大的参考有功功率。考虑两机参考有功功率相同的情况,为了探究参考有功功率对吸引域的影响,参考有功功率在10kW至25kW变化,吸引域变化范围如图7(b)所示。

可以看出,随着参考有功功率P_{refi}的增大,吸引域减小。这是因为,系统功角SEP和UEP是由式(12)和式(13)联立求得的,参考有功功率的变化会导致系统的功角SEP和UEP发生变化。参考功率P_{refi}的增大时,SEP沿着$\delta_1=\delta_2$方向向上移动(如黄色虚线所示),UEP沿着$\delta_1=\delta_2$方向向下移动(如紫色虚线所示),这就导致SEP和UEP的之间距离不断减小,相对暂态稳定裕度减小,系统的暂态稳定性下降。

3.3　电网阻抗变化对系统稳定性的影响

电网阻抗在1mH至4mH的范围变化,吸引域变化范围如图7(c)所示。可以看出,随着电网阻抗的增大,SEP和UEP均发生移动(如黄色虚线和紫色虚线所示),二者之间距离不断减小,导致系统的吸引域不断减小,系统的稳定性变差。

3.4　无功环下垂系数对系统稳定性的影响

无功环下垂系数在400至1000的范围变化,吸引域变化范围如图7(d)所示。可以看出,随着无功环下垂系数的增大,吸引域有略微增大,系统稳定性增强。这是因为增加无功环下垂系数可以增强无功环对电网电压的支撑能力。当无功环下垂系

数趋于无穷大时，无功环的电压输出可以视为恒压源，即不考虑无功环的约束影响，然而这会提高变流器的过流风险[19]。因此，无功环下垂系数的选取不宜过大或过小，过大会增加系统过流风险且降低吸引域的准确性，过小会导致系统的稳定性变差。

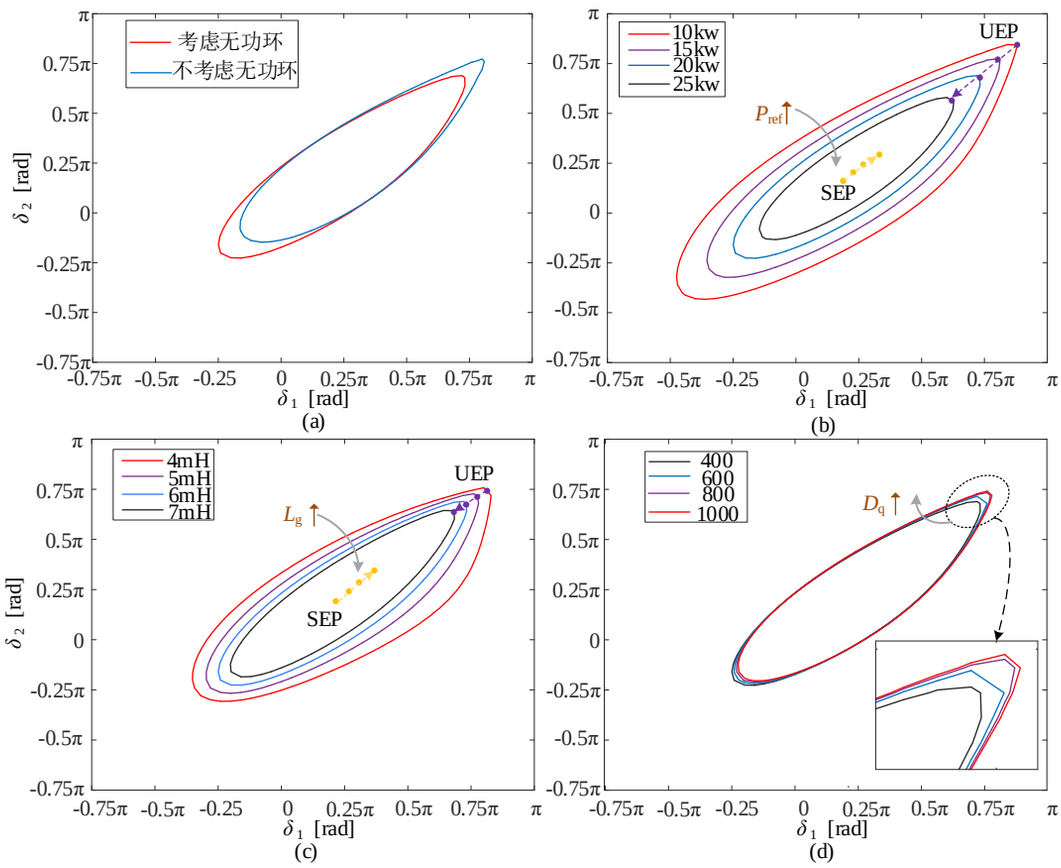


图 7　参数变化对系统暂态稳定性的影响

Fig. 7　Impact of parameters on the transient stability of island microgrid system

3.5　惯量对系统稳定性的影响

增大虚拟惯量 J，变流器故障下功角变化减小，有利于系统暂态同步稳定性的提升。但应当注意的是，虚拟惯量过大，式(2)的动态将由频率变化率主导，阻尼的效应减弱，这会使变流器在相同扰动后需经过更长时间的振荡才能稳定。因此，通过增大 J 提升系统稳定性应的同时应适当增大阻尼系数从而避免系统的调节时间过长。

3.6　阻尼系数对系统稳定性的影响

阻尼的作用使变流器在暂态过程中的能量耗散。阻尼越大，变流器的暂态能量耗散越快，功角 δ_1 和 δ_2 的增大速度越慢，在相同故障时间下，δ_1 和 δ_2 偏离平衡点的距离减小，系统状态不容易越过吸引域边界，较大的阻尼系数有利于系统的暂态同步稳定性。

4　仿真验证

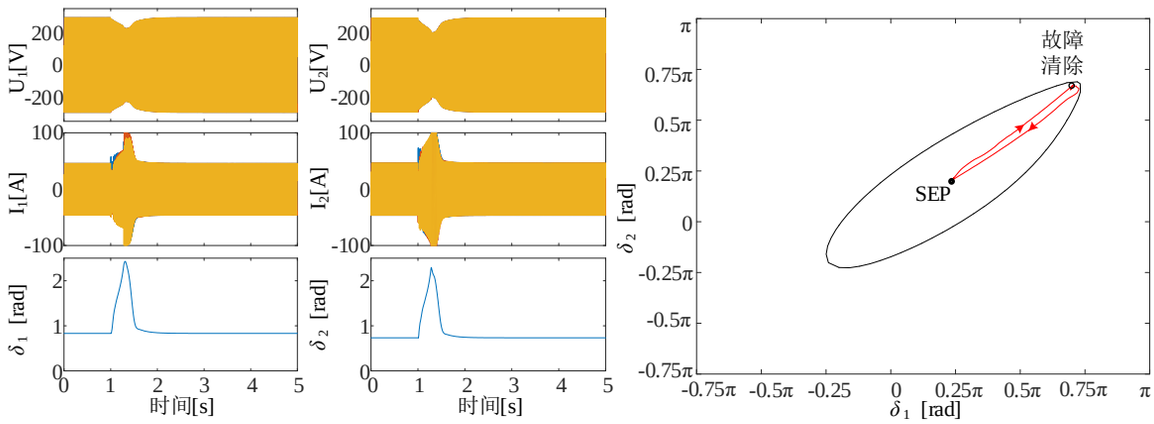
本节利用 Matlab/Simulink 仿真验证第 3 节参数变化对构网型变流器并联系统暂态稳定性的影响。主要参数为：相电压幅值和额定输出电压为 U_g 为 311V；电网阻抗 L_g 为 6mH；电网额定频率 ω_0 为 100π；参考有功功率 P_{ref1}、P_{ref2} 均为 20kW；参考无功功率 Q_{ref1}、Q_{ref2} 均为 0Var；虚拟惯量 J_1 和 J_2 分别为 12、8；阻尼系数 D_{p1}、D_{p2} 为 400；下垂系数 D_{q1}、D_{q2}；电压积分系数 K_1、K_2 均为 100；直流电压为 U_{dc}1000V；线路阻抗 L_1 和 L_2 分别为 3mH、1mH。

4.1　暂态同步稳定性分析理论验证

考虑持续 0.275s 的 60% 三相电压跌落故障，图 8(a)给出了两台变流器的时域图，分别包括输出电压、输出电流和功角。图 8(b)展示了相应的功角 δ_1 和 δ_2 的相位图。

从图 8(a)可以看出，故障清除后，输出电压、电

流和功角回到稳态值,系统暂态同步稳定。图8(b)的相位图表明,在故障清除后系统状态仍位于吸引域内部,这表明故障后系统的暂态能量低于UEP等势面的临界能量。结果为系统状态在式(18)所示的正阻尼作用下渐进稳定于吸引域内部的SEP。



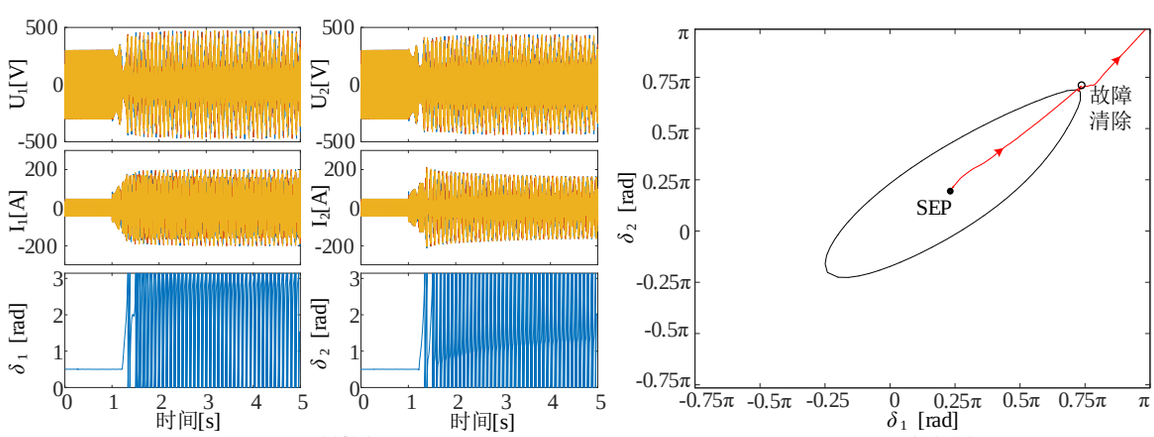
(a)时域图 (b)相位图

图8 持续0.275s的60%电压跌落故障仿真结果

Fig. 8 Simulation results of 60% voltage dip fault lasting 0.275s

为了验证吸引域边界的准确性,将60%三相电压跌落故障时间增加至0.285s,仿真结果如图9所示。

从图9(a)可以看出,故障清除后,输出电压、电流和功角不断振荡,系统暂态不稳定。图9(b)所示,在故障清除后系统状态在吸引域外部,这表明故障后系统的暂态能量超出了位于UEP的临界能量。吸引域外部区域系统暂态能量无法保证其耗散性,从而造成系统失去暂态同步稳定。



(a)时域图 (b)相位图

图9 持续0.285s的60%电压跌落故障仿真结果

Fig. 9 Simulation results of 60% voltage dip fault lasting 0.285s

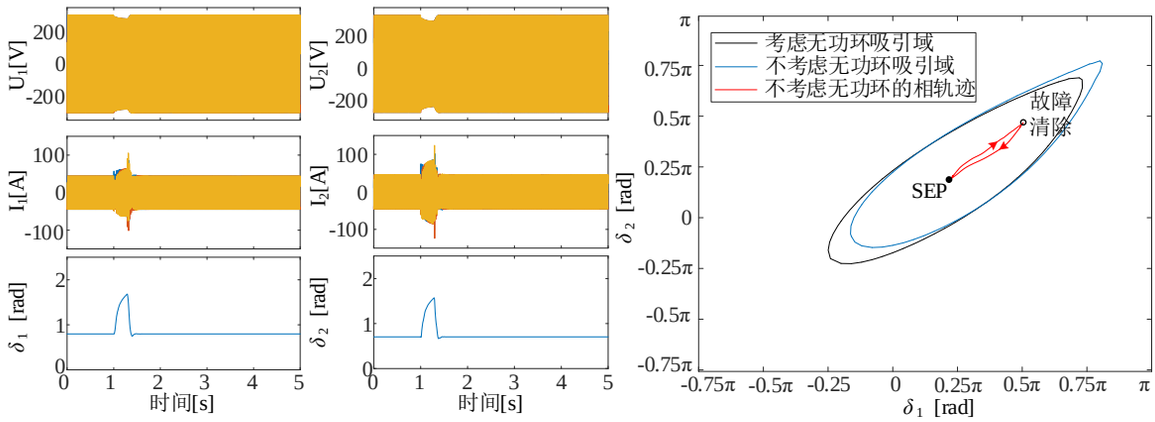
4.2 无功环约束影响验证

为了验证无功环约束对暂态稳定性的影响,考虑与图9相同的故障,仿真结果如图10所示。

从图10(a)可以看出,相同故障下,考虑无功环约束的仿真结果是不稳定的,而不考虑无功环约束的仿真结果是稳定的,这表明不考虑无功环约束的情况下发生了稳定性的误判。图10(b)所示,在故障清除后系统状态在吸引域内部,系统渐进稳定于SEP。值得注意的是,不考虑无功环约束的情况下,相轨迹与图9(b)中的相轨迹有较大差别,故障切除点也位于考虑无功环约束的吸引域内部。这是因为不考虑无功环的约束,系统故障期间的输出电压变化相较于图9(a)更小,根据式(12)所求得功角δ_1和δ_2的变化较小,故系统的相轨迹变化范围没有图9(b)的变化范围大。

在不考虑无功环约束情况下,一方面,所刻画

的吸引域范围较大;另一方面,系统相轨迹状态变化范围减小。因此,不考虑无功环的约束,系统的暂态同步稳定性更易发生误判。为了准确刻画吸引域范围和真实的相轨迹,在进行暂态同步稳定性分析时应当考虑无功环的影响。



(a)时域图 (b)相位图

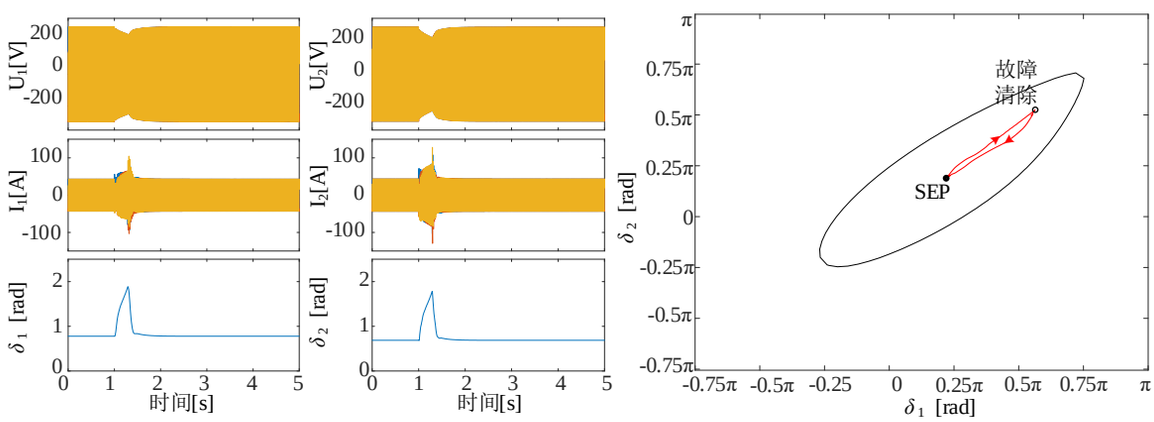
图 10 不考虑无功环仿真结果

Fig. 10 Simulation results of reactive power loops are not considered

4.3 参考有功功率变化对暂态同步稳定性影响的验证

考虑与图 9 相同的故障,将两台变流器的参考有功功率下调至 19kW,仿真结果如图 11 所示。

从图 11(a)可以看出,相同故障下,下调参考有功功率后的仿真结果由不稳定变成了稳定。相轨迹如图 11(b),在故障清除后系统状态在吸引域内部,系统渐进稳定于 SEP。仿真结果说明下调有功功率有利于系统的暂态同步稳定性,与理论分析一致。



(a)时域图 (b)相位图

图 11 P_{ref} 下调至 19kW 仿真结果

Fig. 11 Simulation results of P_{ref} down to 19kW

4.4 电网阻抗对暂态同步稳定性影响的验证

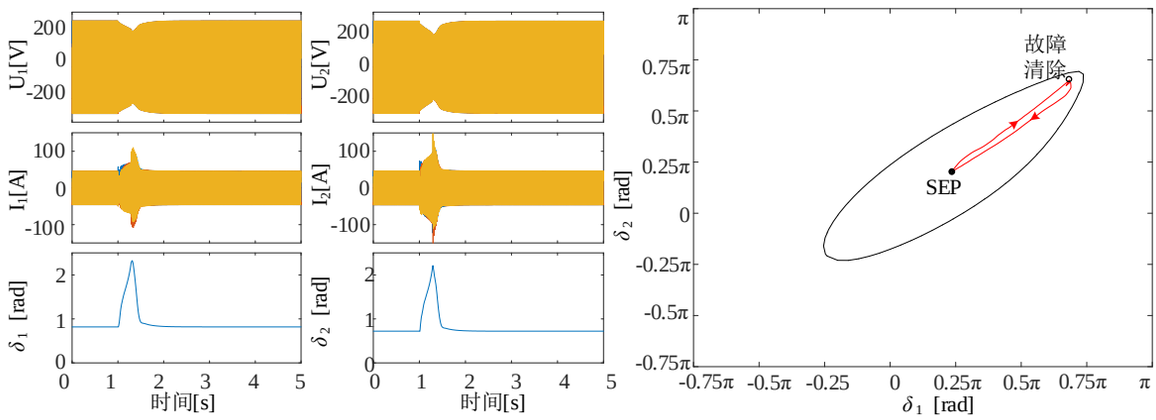
考虑与图 9 相同的故障,电网阻抗下调至 5.9mH,仿真结果如图 12 所示。

从图 12(a)可以看出,相同故障下,减小电网阻抗后的仿真结果由不稳定变成了稳定。相轨迹如图 12(b),在故障清除后系统状态在吸引域内部,系统渐进稳定于 SEP。仿真结果说明减小电网阻抗有利于系统的暂态同步稳定性,与理论分析一致。

4.5 无功环下垂系数对暂态同步稳定性影响的验证

考虑与图 9 相同的故障,将两台变流器的无功环下垂系数上调至 800,仿真结果如图 13 所示。

从图 13(a)可以看出,相同故障下,上调无功环下垂系数后变流器对电网电压的支撑能力变强,仿真结果由不稳定变成了稳定。相轨迹如图 13(b),在故障清除后系统状态在吸引域内部,系统渐进稳

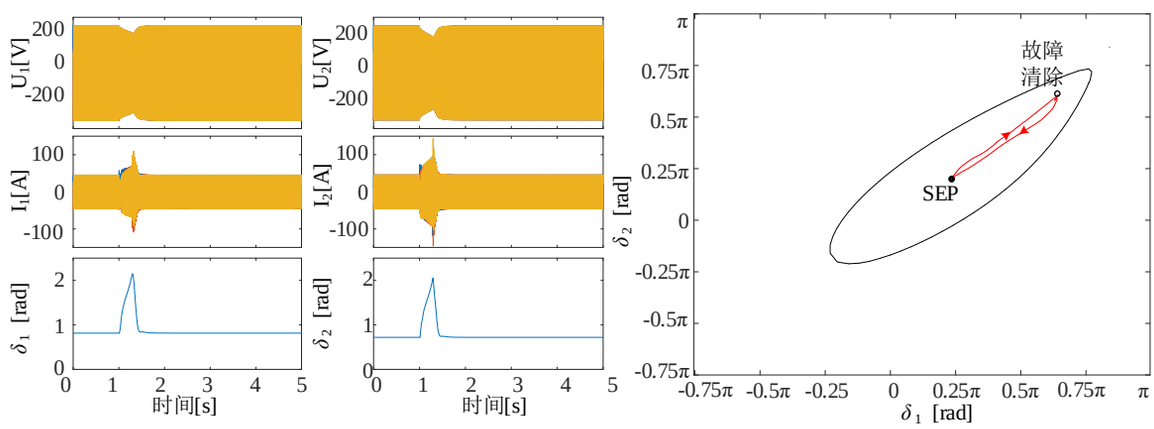


(a)时域图 (b)相位图

图 12 L_g 下调至 5.9mH 仿真结果

Fig. 12 Simulation results of L_g down to 5.9mH

定于SEP。仿真结果说明上调无功环下垂系数有利于系统的暂态同步稳定性,与理论分析一致。



(a)时域图 (b)相位图

图 13 D_q 上调至 800 仿真结果

Fig. 13 Simulation results of D_q up to 800

4.6 惯量对暂态同步稳定性影响的验证

考虑与图9相同的故障,将两台变流器的惯量分别上调至96和72,仿真结果如图14所示。

从图14(a)可以看出,相同故障下,增大惯量后功角偏离平衡位置距离减小,仿真结果由不稳定变成了稳定。相轨迹如图14(b),在故障清除时系统状态在吸引域内部,系统渐进稳定于SEP。仿真结果说明增大惯量有利于系统的暂态同步稳定性,但大惯量也使得系统状态在平衡点处发生了振荡,调节时间变长,与理论分析一致。

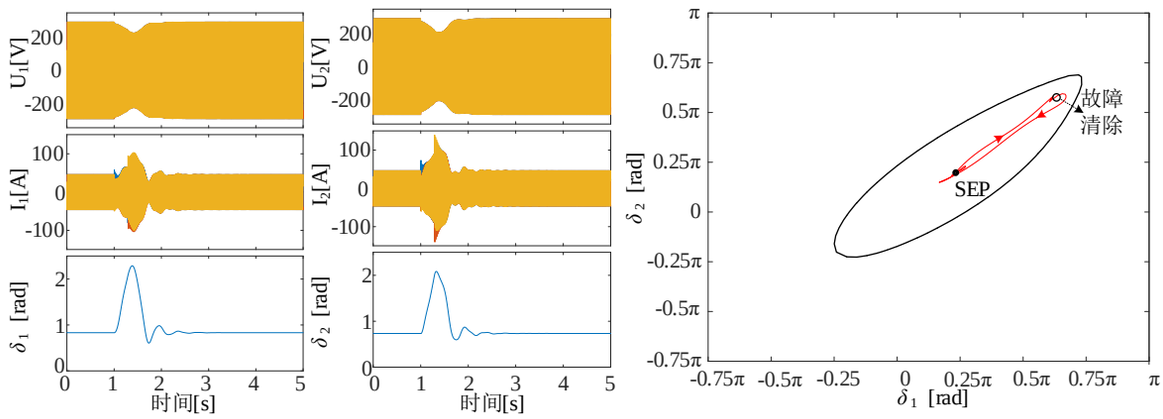
4.7 阻尼系数对暂态同步稳定性影响的验证

考虑与图9相同的故障,将两台变流器的阻尼系数上调至800,仿真结果如图15所示。

从图15(a)可以看出,相同故障下,增大阻尼系数后,仿真结果由不稳定变成了稳定。相轨迹如图15(b),在故障清除时系统状态在吸引域内部,系统渐进稳定于SEP。仿真结果说明增大阻尼系数有利于系统的暂态同步稳定性,与理论分析一致。

5 结论

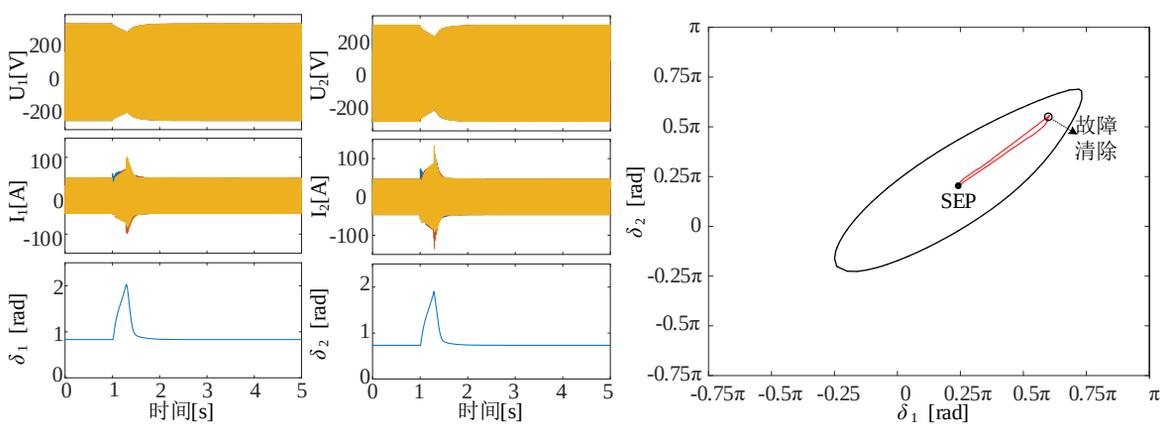
本文在考虑无功环的电压约束下通过首次积分法建立了构网型变流器并联系统暂态能量模型,并利用李雅普诺夫直接法估计了系统的吸引域范围:当系统相轨迹在吸引域内运动时,系统能量耗散,使得系统状态恢复至稳定平衡点;当系统相轨迹超出吸引域边界后,系统的能量会逐渐增大,并最终超过势能边界,导致系统失去暂态稳定性。在此基础上,分析了无功环的约束、有功功率、电网阻抗、无功环下垂系数对吸引域的影响。考虑无功环的约束会使暂态稳定性判断更加准确。增大参考



(a)时域图 (b)相位图

图 14 J_1和J_2分别上调至 96 和 72 仿真结果

Fig. 14 Simulation results of J_1 and J_2 up to 96 and 72



(a)时域图 (b)相位图

图 15 D_p上调至 800 仿真结果

Fig. 15 Simulation results of D_p up to 800

有功功率、减小电网阻抗、增大无功环下垂系数、惯量和阻尼系数均有利于系统暂态同步稳定性，相应的仿真结果验证了理论分析的有效性。考虑更多构网型变流器的暂态同步稳定性分析将在后续的研究中进行。

参考文献：

[1] 孙秋野，李大双，王睿，等．“双高”电力系统：一种新的稳定判据和稳定性分类探讨[J]. 中国电机工程学报，2024，44(08):3016-3036.
SUN Qiuye, LI Dashuang, WANG Rui, et al. Power System With High Shares of Renewables and Power Electronics: A New Stability Criterion and Classification[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(08): 3016-3036.

[2] 国家电网．国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[N]. 国家电网报，2021-03-02(001).

[3] 谢小荣，贺静波，毛航银，等“. 双高”电力系统稳定性的新问题及 分类探讨[J]. 中国电机工程学报，2021，41(2)：461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.

[4] 杨鹏，刘锋，姜齐荣，等“. 双高”电力系统大扰动稳定性：问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2021，61(5)：403-414.
YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.

[5] J. Zhao, M. Huang, H. Yan, C. K. Tse and X. Zha, "Nonlinear and Transient Stability Analysis of

Phase-Locked Loops in Grid-Connected Converters," IEEE Transactions on Power Electronics,2021, 36(1): 1018-1029.

[6] Markovic U, Stanojev O, Aristidou P, et al. Understanding small-signal stability of low-inertia systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 3997-4017.

[7] FU Xikun , HUANG Meng , PAN Shangzhi, et al. Cascading Synchronization Instability in Multi-VSC Grid-Connected System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021, 36(5): 3997-4017.

[8] 詹长江,吴恒,王雄飞等.构网型变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(06):2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An Overview of Stability Studies of Grid-forming Voltage-source Converters [J]. Proceedings of the CSEE 2023,43(06):2339-2359.

[9] 郑天文,陈来军,陈天一,等.虚拟同步发电机技术及展望[J].电力系统自动化,2015,39(21):165-175.
ZHENG Tianwen,CHEN Laijun,CHEN Tianyi,et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(21):165-175.

[10] H. -P. Beck and R. Hesse , "Virtual synchronous machine," in Proc. 9thInt. Conf. Elect. Power Qual. Utilisation, Barcelona, Spain, Oct. 2007,pp. 1 - 6.

[11] Unruh P, Nuschke M, Strau P, et al. Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods[J]. Energies, 2020, 13(10): 2589

[12] 程慧婕, 帅智康, 彭也伦, 等. 含异步机负荷的虚拟同步机并联系统暂态电压稳定性分析及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 12.
CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, PENG Yelun, et al. Study on Transient Voltage Stability and Improvement Measures of Paralleled Virtual Synchronous Generators System With Induction Motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 12.

[13] 屈子森, 蔡云旖, 杨欢, 等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018,42(17): 58-66.
QU Zisen, CAI Yunyi, YANG Huan, et al. Strategy of Power Decoupling Control for Virtual Synchronous Generator Based on Adaptive Virtual Impedance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 58-66.

[14] FU Xikun , SUN Jianjun , HUANG Meng , et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: A comparative study[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,36(7): 7832-7840.

[15] WANG Xiongfei, M. G. Taul, WU Heng, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—An overview[J] . IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.

[16] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,10(4):4648-4661.

[17] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2020,8(2):1019-1033.

[18] YANG Jingxi, Chi K Tse, HUANG Meng , et al. Homoclinic bifurcation of a grid-forming voltage source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(11):13176-13187.

[19] 付熙坤,黄萌,凌扬坚,等.功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J].中国电机工程学报,2024,44(07):2815-2825.
Fuxikun, Huangmeng, LING Yangjian, Zhang et al. Transient Synchronization Stability Analysis of Grid-Forming Converter Influenced by Power-Coupling and Current-Limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(07):2815-2825.

[20] 魏凤廷,张海涛,王秀丽等.计及电压动态特性的虚拟同步机暂态稳定性分析[J].电网技术,1-11. [2024-03-12]. https://doi. org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2023. 0987.
WEI Fengting, ZHNG Haitao, WANG Xiuli, et al. Transient Stability Analysis of Virtual Synchronous Generator Considering Voltage Dynamic Characteristics [J/OL]. 1-11

[21] 汪春江,孙建军,宫金武,等.并网逆变器与电网阻抗交互失稳机理及阻尼策略[J].电工技术学报,2020, 35(增刊2): 503-511.
WANG Chunjiang, SUN Jianjun, GONG Jinwu, et al. Mechanism and damping strategy of interactive instability between grid-connected inverter and grid impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (Supplement 2):503-511.

[22] CHEN M, ZHOU D, WU C, et al. Characteristics of parallel inverters applying virtual synchronous generator control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(6):4690-4701.

[23] 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.

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).

[24] 任碧莹,邱姣姣,刘欢,等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 128-138.
Ren Biying, Qiu Jiaojiao, Liu Huan, et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 128-138(in Chinese).

[25] 曾德银,姚骏,张田,等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究[J]中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2048-2061.
ZENG Deyin, YAO Jun*, ZHANG Tian, et al. Research on Frequency Small-signal Stability Analysis of Multi-parallel Virtual Synchronous Generator-based System [J]. Proceedings of the CSEE 2020, 40(7): 2048-2061.

[26] 涂春鸣,谢伟杰,肖凡,等. 多虚拟同步发电机并联系统控制参数对稳定性的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2020,40(15): 77-86.
TU Chunming, XIE Weijie, XIAO Fan, et al. Influence Analysis of Control Parameters of Parallel System with Multiple Virtual Synchronous Generators on Stability [J]. Automation of Electric Power Systems 2020,40(15): 77-86.