

含静止无功发生器的直驱风电并网系统 稳定性分析及振荡抑制策略

张芳¹,王赫¹,李传栋²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院,福建 福州 350007)

摘要:风电并网系统稳定性分析及振荡抑制策略大多集中于风电场本身,针对含静止无功发生器(SVG)的直驱风电并网系统研究较少。基于特征值灵敏度筛选出对含SVG的直驱风电并网系统稳定性较显著的控制通道,然后基于独立通道分析设计理论将并网系统由多输入多输出耦合系统等效拆分为多个单输入单输出控制通道,在定性分析并网系统稳定性的同时定量评估不同控制通道间的交互作用程度。为抑制控制通道间的交互作用,提出了基于 H_{∞} 鲁棒控制的次同步振荡抑制策略。通过电磁暂态仿真,验证了基于独立通道分析设计理论分析并网系统稳定性的正确性以及基于 H_{∞} 鲁棒控制的次同步振荡抑制策略的有效性。

关键词:直驱风电机组;静止无功发生器;独立通道; H_{∞} 鲁棒控制;振荡抑制

中图分类号:TM614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202310005

0 引言

风力发电的不确定性会引起系统电压的波动,故大规模风电场需配备一定的无功补偿装置来维持并网点电压的稳定,然而电力系统的电力电子化使得电网结构发生新的变化,风机与电网之间的交互作用也越来越复杂。我国新疆哈密地区发生过多起由风电场与静止无功发生器(static var generator, SVG)的交互作用引发的次同步振荡^[1-2],导致大量风机和SVG脱网,目前此类振荡事故的发生机理尚未明确。因此对含SVG的直驱风电并网系统进行稳定性分析,并研究相应的振荡抑制策略,对于提高风电并网系统的稳定性具有重要的工程意义。

目前风电并网系统稳定性分析方法主要有特征值分析法和阻抗分析法。特征值分析法通过建立系统的小信号状态空间模型,求解状态矩阵的特征值以及对应的左右特征向量得到系统的特征信息。文献[3]建立了含SVG的双馈风电场小信号模型,通过根轨迹分析设备运行状态和控制参数对系统稳定性的影响。文献[4]通过研究无串补情况下的直驱风电场并入交流电网的次同步振荡机理,指出风机并网台数越多则系统阻尼越弱。文献[5]建立含SVG的直驱风电并网系统状态空间模型,基于参与因子分析观察并网系统中装置间的耦合作用特性,指出SVG的并入会减弱系统的阻尼,从而引发次同步振荡。

阻抗分析法通过建立系统小信号阻抗模型,利用电路原理或Nyquist稳定判据分析系统失稳机理。

文献[6]建立了计及转子侧控制的双馈风机等值电路,分析了转子侧内外环耦合交互影响。文献[7]建立了系统谐波线性化阻抗模型,指出在振荡频率点,SVG、并联电容器和双馈风机并联后呈现等效负电阻-电容特性。文献[8]和文献[9]分别建立了集成SVG直驱风电场的正序阻抗模型和输入导纳模型,研究了SVG工作模式和控制器参数对风电场稳定性的影响。

特征值分析法可以准确判断系统的小干扰稳定性,但容易造成“维数灾”的问题,并且难以对系统失稳进行机理解释。阻抗分析法物理意义清晰,但难以对设备间的交互作用展开分析。因此现有稳定性分析方法可分析系统小干扰稳定性,但难以量化不同控制通道间的交互作用程度。

风电并网系统振荡抑制策略主要有优化控制器参数、附加滤波装置、附加阻尼控制器、改进换流器控制策略等。文献[10]通过优化风电机组变流器电流环和锁相环的控制参数,降低了风电场经高压直流输电并网系统发生次同步振荡的风险。文献[11]和文献[12]分别在串补线路和双馈风机转子侧换流器的控制回路中附加滤波装置,以过滤次同步振荡信号。文献[13]和文献[14]分别在双馈风机转子侧换流器和并联电压源变流器中附加阻尼控制器,等效改善系统阻尼。文献[15]基于自抗扰控制设计了直驱风机网侧变换器(grid side converter, GSC)的电流内环控制,通过实时估计与补偿来阻断直驱风电场与电网间的交互作用。

针对现有分析风电并网系统稳定性方法不能量化控制通道间交互作用强度的不足,并为丰富现有振荡抑制策略,本文提出了一种基于独立通道分析

设计(individual channel analysis and design, ICAD)理论的含SVG直驱风电并网系统稳定性分析方法。该方法首先基于特征值灵敏度分析各控制器参数变化对系统小干扰稳定性的影响,筛选出对系统稳定性影响较显著的控制通道。经过控制通道筛选后,含SVG的直驱风电控制系统由4输入4输出系统简化为2输入2输出耦合系统;然后根据ICAD理论,将2输入2输出耦合系统等效拆分为2个单输入单输出(single-input single-output, SISO)的独立控制通道,从而降低了多变量系统稳定性分析的难度。除上述优势外,ICAD理论中交互作用因子的概念,区别于现有方法中衡量各状态变量对振荡模态参与程度的参与因子分析,ICAD理论的交互作用因子可以直接对控制通道间的交互作用进行定量评估,相比参与因子更注重控制通道间的交互作用。因此本文提出的基于ICAD理论的含SVG直驱风电并网系统稳定性分析方法可以在定性分析系统稳定性的同时对不同控制通道间的交互作用程度进行量化。同时,为抑制控制通道间的交互作用,本文提出了一种基于 H_∞ 鲁棒控制的次同步振荡抑制策略。最后,通过对多种算例进行仿真,验证了本文所提基于ICAD理论的并网系统稳定性分析方法的正确性以及基于 H_∞ 鲁棒控制的次同步振荡抑制策略的有效性。

1 含SVG的直驱风电并网系统

含SVG的直驱风电并网系统主电路及控制部分见附录A图A1。风电场由10台型号相同、容量5 MW的直驱风机并联组成,SVG额定容量为10 Mvar,风电场与SVG分别经0.69 kV/35 kV升压变压器 T_1 和 T_2 接入公共并网点(point of common coupling, PCC),然后通过35 kV输电线路并入交流电网。

系统参数及控制器参数分别见附录A表A1和表A2,GSC、SVG及外部交流系统数学模型见附录A式(A1)~(A11)。

2 基于特征值灵敏度的控制通道筛选

为减轻计算量,同时突出研究问题的重点,本章对建立的含SVG直驱风电并网系统小信号模型进行基于特征值灵敏度的分析^[16],筛选出对系统小干扰稳定性影响较显著的控制通道。由于永磁直驱同步发电机的惯性较大、直驱风机机侧部分(风轮机、永磁直驱同步发电机和机侧换流器)的时间尺度远大于GSC,因此建模分析时忽略直驱风机的机侧部分,仅考虑GSC,即控制系统模型包括GSC的直流电压 d 轴、无功功率 q 轴控制回路以及SVG的直流电压 d 轴、交流电压 q 轴控制回路,此时含SVG的直驱风

电控制系统为如图1所示的4输入4输出系统。图中: $\mathbf{K}_{\text{all}}(s)=[K_1, K_2, K_3, K_4]^T$ 为控制器矩阵,其元素 $K_1=K_{p5}+K_{i5}/s$ 、 $K_3=K_{p7}+K_{i7}/s$ 分别为SVG的直流电压外环 d 轴和交流电压外环 q 轴的比例积分(proportional integral, PI)控制器传递函数, $K_2=K_{p1}+K_{i1}/s$ 、 $K_4=K_{p3}+K_{i3}/s$ 分别为GSC的电压外环 d 轴和无功外环 q 轴的PI控制器传递函数; $\Delta \mathbf{r}_{\text{all}}(s)=[\Delta V_{\text{dref}}, \Delta U_{\text{pccref}}, \Delta U_{\text{dref}}, \Delta Q_{\text{wref}}]^T$ 为参考输入变量,其中 ΔV_{dref} 、 ΔU_{pccref} 分别为SVG直流电压参考值、交流电压参考值的变化量, ΔU_{dref} 、 ΔQ_{wref} 分别为GSC直流电压参考值、无功功率参考值的变化量; $\Delta \mathbf{u}_{\text{all}}(s)=[\Delta i_{\text{cdref}}, \Delta i_{\text{cqref}}, \Delta i_{\text{gdref}}, \Delta i_{\text{gqref}}]^T$ 为控制信号,其中 Δi_{cdref} 、 Δi_{cqref} 分别为SVG电流内环 d 、 q 轴参考值的变化量, Δi_{gdref} 、 Δi_{gqref} 分别为GSC电流内环 d 、 q 轴参考值的变化量; $\Delta \mathbf{w}_{\text{all}}(s)=[\Delta V_{\text{dc}}, \Delta U_{\text{pcc}}, \Delta U_{\text{dc}}, \Delta Q_{\text{w}}]^T$ 为输出变量,其中 ΔV_{dc} 、 ΔU_{pcc} 分别为SVG直流电压、交流电压的变化量, ΔU_{dc} 、 ΔQ_{w} 分别为GSC直流电压、无功功率的变化量; $\mathbf{G}_{\text{all}}(s)$ 为4输入4输出系统的被控对象。

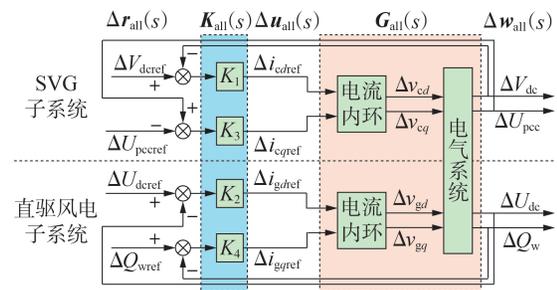


图1 4×4含SVG的直驱风电控制系统结构框图

Fig.1 4×4 block diagram of direct-drive wind power control system with SVG

根据附录A建立含SVG的直驱风电并网系统小信号模型为:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{all}} = \mathbf{A}_{\text{all}} \Delta \mathbf{x}_{\text{all}} \quad (1)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}_{\text{all}}$ 为系统相关的状态变量; \mathbf{A}_{all} 为系统状态矩阵。

特征值灵敏度表示为:

$$\frac{\partial \lambda(\mu)}{\partial \mu} = \mathbf{l}^T(\mu) \frac{\partial \mathbf{A}_{\text{all}}(\mu)}{\partial \mu} \mathbf{v}(\mu) \quad (2)$$

式中: μ 为GSC及SVG中各 d 、 q 轴内外环PI控制器的比例和积分系数; $\lambda(\mu)$ 、 $\mathbf{l}(\mu)$ 和 $\mathbf{v}(\mu)$ 分别为状态矩阵 \mathbf{A}_{all} 的特征值、左特征向量和右特征向量,在规格化取法中, $\mathbf{l}^T(\mu) \mathbf{v}(\mu) = 1$ 。

根据表A1、A2的参数计算系统特征值,其中具有振荡模态的特征值及对应阻尼比如表1所示。由表可知,振荡模态 $\lambda_{8,9}$ 的阻尼比较大,当系统受到扰动时,该模态对系统小干扰稳定性影响较小,因此在进行灵敏度分析时,仅考虑 $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{3,4}$ 和 $\lambda_{5,6}$ 这3组振荡模态。根据式(2)计算上述3组振荡模态下各控

制器参数的特征值灵敏度实部,结果见附录B图B1。由图可知,特征值灵敏度实部绝对值较大的控制器参数为GSC电流内环 d 轴比例系数 K_{p2} 和SVG电压外环 d 轴比例系数 K_{p5} ,因此可筛选出对系统稳定性影响较显著的控制通道为GSC的直流电压 d 轴控制回路和SVG的直流电压 d 轴控制回路,含SVG的直驱风电控制系统可由4输入4输出系统简化为2输入2输出系统。

表1 含SVG的直驱风电并网系统特征值及对应阻尼比

Table 1 Eigenvalues of direct-drive wind power grid-connected system with SVG and corresponding damping ratios

振荡模式	特征值	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	$-437.47 \pm j497.06$	0.6607
$\lambda_{3,4}$	$-34.59 \pm j258.06$	0.1328
$\lambda_{5,6}$	$-121.72 \pm j201.26$	0.5175
$\lambda_{8,9}$	$-172.07 \pm j0.45$	0.9999

3 基于ICAD理论的含SVG直驱风电并网系统稳定性分析

本章在第2章控制通道筛选的基础上,基于ICAD理论对含SVG的直驱风电并网系统进行稳定性分析,同时分析直驱风电机组与SVG之间的交互作用程度。

3.1 ICAD理论

ICAD理论^[17-18]将经典控制理论与现代多变量反馈控制理论相结合,已广泛应用于多变量系统的分析和设计。其主要思想是在不损失任何信息的前提下,通过数学变换将多输入多输出系统(multi-input multi-output, MIMO)系统等效拆分为多个SISO控制通道,即可采用分析SISO系统的Nyquist判据处理MIMO系统,降低了MIMO系统稳定性分析的难度。此外,ICAD理论可以在定性判断系统稳定性的同时,根据交互作用因子的大小定量评估不同控制通道间的交互作用程度。

经控制通道筛选后,含SVG的直驱风电并网系统简化为图2所示的2输入2输出耦合系统。图中: $\Delta r(s)=[\Delta r_1, \Delta r_2]^T=[\Delta V_{dref}, \Delta U_{dref}]^T$; $\Delta u(s)=[\Delta u_1, \Delta u_2]^T=$

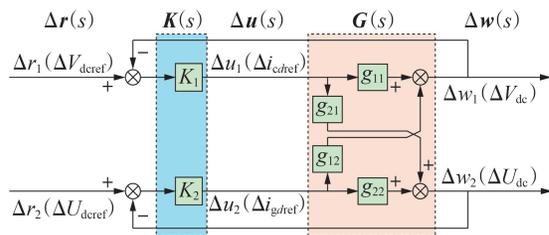


图2 含SVG的直驱风电控制系统2×2结构框图

Fig.2 2×2 block diagram of direct-drive wind power control system with SVG

$[\Delta i_{dref}, \Delta i_{gref}]^T$; $\Delta w(s)=[\Delta w_1, \Delta w_2]^T=[\Delta V_{dc}, \Delta U_{dc}]^T$; $G(s)$ 为被控对象的传递函数矩阵,矩阵中各元素为 g_{11} 、 g_{12} 、 g_{21} 、 g_{22} , $G(s)$ 的建立过程见附录B式(B1)、(B2)。

由图2可知,该系统属于多变量耦合系统,即任意一个回路的输出不仅与该回路的参数有关,还受另一个回路的影响,其数学关系可表示为:

$$\begin{cases} \Delta w_1 = (\Delta r_1 - \Delta w_1) K_1 g_{11} + (\Delta r_2 - \Delta w_2) K_2 g_{12} \\ \Delta w_2 = (\Delta r_2 - \Delta w_2) K_2 g_{22} + (\Delta r_1 - \Delta w_1) K_1 g_{21} \end{cases} \quad (3)$$

求解式(3)可得到相对解耦的独立通道模型,其数学形式为:

$$\begin{cases} \Delta w_1 = (\Delta r_1 - \Delta w_1) K_1 [g_{11}(1 - \gamma h_2)] + \Delta r_2 g_{12} g_{22}^{-1} h_2 \\ \Delta w_2 = (\Delta r_2 - \Delta w_2) K_2 [g_{22}(1 - \gamma h_1)] + \Delta r_1 g_{21} g_{11}^{-1} h_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $h_1 = K_1 g_{11} / (1 + K_1 g_{11})$, $h_2 = K_2 g_{22} / (1 + K_2 g_{22})$; γ 为交互作用因子,其表达形式如式(5)所示。

$$\gamma = \frac{g_{12} g_{21}}{g_{11} g_{22}} \quad (5)$$

观察式(4)的组成成分,等号右侧第一项仅包含该控制通道的参考输入 Δr_i ($i=1, 2$)和输出 Δw_i ,因此可将其视为一个无耦合的前向通道;第二项包含其他控制通道的参考输入 Δr_j ($j=1, 2$ 且 $j \neq i$),因此可将其视为其他控制通道对该控制通道的干扰。根据式(4),可将图2所示的2×2耦合系统重新表示为如图3所示的2个SISO的等效独立控制通道,其中每个控制通道包括一个独立的控制器 K_i 和干扰信号 d_i 。

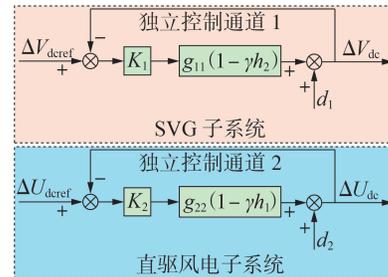


图3 含SVG的直驱风电并网系统等效独立控制通道

Fig.3 Equivalent individual control channels of direct-drive wind power grid-connected system with SVG

综上,独立控制通道1的开环传递函数 C_1 及干扰信号 d_1 表示为:

$$\begin{cases} C_1 = K_1 g_{11} (1 - \gamma h_2) \\ d_1 = g_{12} g_{22}^{-1} h_2 \Delta r_2 \end{cases} \quad (6)$$

独立控制通道2的开环传递函数 C_2 及干扰信号 d_2 表示为:

$$\begin{cases} C_2 = K_2 g_{22} (1 - \gamma h_1) \\ d_2 = g_{21} g_{11}^{-1} h_1 \Delta r_1 \end{cases} \quad (7)$$

根据每个独立控制通道的开环传递函数 C_i ,利

用Nyquist稳定性判据分析该独立控制通道的稳定性,进而判断整个系统的稳定性:若2个独立控制通道均稳定,则整个系统小干扰稳定;若存在1个独立控制通道不稳定,则整个系统小干扰不稳定。

同时,交互作用因子 γ 可以衡量独立控制通道1、2之间的交互作用强度,即SVG与直驱风电机组之间的交互作用, γ 的幅值越大,设备间的交互作用程度越强。

因此通过式(5)~(7),可以在定性分析含SVG的直驱风电并网系统小干扰稳定性的同时,定量评估SVG和直驱风电机组之间的交互作用强度。

3.2 含SVG的直驱风电并网系统稳定性影响因素分析

本节分别考虑直驱风机并网台数变化、GSC和SVG的控制参数变化对系统小干扰稳定性的影响。

3.2.1 直驱风机并网台数变化对稳定性的影响

保持其他参数不变,直驱风机并网台数 $n=10$,图3所示的独立控制通道1、2的Nyquist曲线如图4所示。

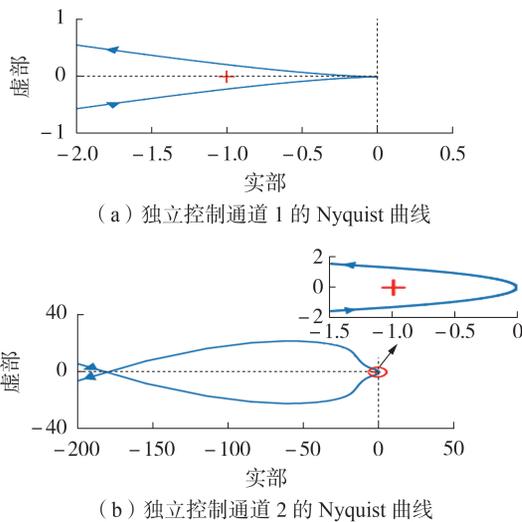


图4 $n=10$ 时2个等效独立控制通道的Nyquist曲线
Fig.4 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $n=10$

设开环传递函数右半平面极点个数为 p ,Nyquist曲线逆时针围绕 $(-1, j0)$ 的圈数为 N ,闭环传递函数右半平面极点个数为 z ,根据Nyquist稳定性判据可知: $z=p-N$ 。2个独立控制通道稳定性分析如表2所示。由表可知,当 $n=10$ 时,独立控制通道1、2均稳定,则整个系统小干扰稳定。

当 $n=18$ 时,图3所示的独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C1,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C1。由表C1可知,当 $n=18$ 时,独立控制通道1稳定而独立控制通道2不稳定,则整个系统小干扰不稳定。

表2 $n=10$ 时的2个等效独立控制通道稳定性分析

Table 2 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $n=10$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道1	0	0	0	是
通道2	2	2	0	是

上述2种情况对应的交互作用因子 γ 的Nyquist曲线如图5所示。由图可知,当 n 增大时, γ 的幅值增大,SVG与直驱风机之间的交互作用增强。综合上述分析结果可知,直驱风机并网台数越多,系统越不稳定,从而引发系统振荡。

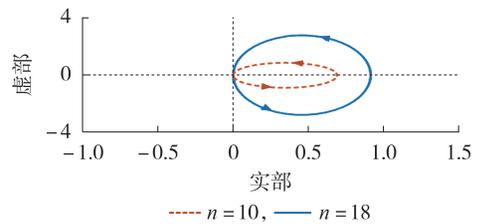


图5 直驱风机并网台数变化时 γ 的Nyquist曲线

Fig.5 Nyquist plots of γ with variation of number of grid-connected direct-drive wind turbines

3.2.2 GSC电流内环 d 轴比例系数对稳定性的影响

保持其他参数不变,仅改变GSC电流内环 d 轴比例系数 K_{p2} ,当 $K_{p2}=0.2$ 时,独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C2,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C2。由表C2可知,当 $K_{p2}=0.2$ 时,独立控制通道1、2均稳定,则整个系统小干扰稳定。

当 $K_{p2}=0.1$ 时,独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C3,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C3。由表C3可知,当 $K_{p2}=0.1$ 时,独立控制通道1稳定而独立控制通道2不稳定,则整个系统小干扰不稳定。

上述2种情况对应的交互作用因子 γ 的Nyquist曲线见附录C图C4。由图可知,当 K_{p2} 减小时, γ 的幅值增大,SVG与直驱风机之间的交互作用增强。综合上述分析结果可知,较小的 K_{p2} 将导致系统不稳定,从而引发系统振荡。

3.2.3 SVG电压外环 d 轴比例系数对稳定性的影响

保持其他参数不变,仅改变SVG电压外环 d 轴比例系数 K_{p5} ,当 $K_{p5}=0.3$ 时,独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C5,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C4。由表C4可知,当 $K_{p5}=0.3$ 时,独立控制通道1、2均稳定,则整个系统小干扰稳定。

当 $K_{p5}=0.2$ 时,独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C6,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C5。由表C5可知,当 $K_{p5}=0.2$ 时,独立控制通道1不稳定而独立控制通道2稳定,则整个系统小干扰

不稳定。

上述2种情况对应的交互作用因子 γ 的Nyquist曲线见附录C图C7。由图可知,当 K_{p5} 减小时, γ 的幅值增大,SVG与直驱风机之间的交互作用增强。综合上述分析结果可知,较小的 K_{p5} 将导致系统不稳定,从而引发系统振荡。

3.2.4 SVG电流内环 d 轴比例系数对稳定性的影响

保持其他参数不变,仅改变SVG电流内环 d 轴比例系数 K_{p6} ,当 $K_{p6}=0.4$ 时,独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C8,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C6。由表C6可知,当 $K_{p6}=0.4$ 时,独立控制通道1、2均稳定,则整个系统小干扰稳定。

当 $K_{p6}=0.3$ 时,独立控制通道1、2的Nyquist曲线见附录C图C9,各独立控制通道稳定性分析见附录C表C7。由表C7可知,当 $K_{p6}=0.3$ 时,独立控制通道1不稳定而独立控制通道2稳定,则整个系统小干扰不稳定。

上述2种情况对应的交互作用因子 γ 的Nyquist曲线见附录C图C10。由图可知,当 K_{p6} 减小时, γ 的幅值增大,SVG与直驱风机之间的交互作用增强。综合上述分析结果可知,较小的 K_{p6} 将导致系统不稳定,从而引发系统振荡。

3.3 基于特征值分析法的理论验证

为验证本文控制通道筛选以及基于ICAD理论的含SVG直驱风电并网系统稳定性分析结果的正确性,本节对式(1)所示的控制通道筛选前的并网系统(其控制系统为图1所示的 4×4 耦合系统)基于特征值分析法得到直驱风机并网台数及控制器参数变化时的根轨迹,见附录C图C11。由图可知,直驱风机并网台数越多、GSC电流内环 d 轴比例系数 K_{p2} 越小、SVG电压外环 d 轴比例系数 K_{p5} 越小、SVG电流内环 d 轴比例系数 K_{p6} 越小,特征值向右移动逐渐穿越虚轴,系统越趋于不稳定。对控制通道筛选前的并网系统基于特征值分析法得到的结论与基于ICAD理论对控制通道筛选后的 2×2 耦合系统稳定性分析得到的结论一致,并且与文献[5]结论一致,从而验证了本文控制通道筛选以及基于ICAD理论对含SVG直驱风电并网系统稳定性分析的正确性。

4 基于 H_∞ 鲁棒控制的次同步振荡抑制策略

由图3可知,经控制系统等效解耦后,含SVG的直驱风电并网系统可视为带有干扰项的系统。PI控制器虽然结构简单、应用广泛,但无法抑制外部扰动对系统造成的影响。 H_∞ 鲁棒控制器在设计阶段,分别考虑了模型误差、干扰信号等因素,具有良好的扰动抑制能力,适用于具有参数不确定性以及外部扰动的系统^[19]。由特征值灵敏度分析可知,对含SVG

的直驱风电并网系统小干扰稳定性影响最显著的控制通道为GSC的直流电压 d 轴控制回路,即图3中的独立控制通道2。因此,本文在独立控制通道2的电压外环控制中引入 H_∞ 鲁棒控制器,抑制由SVG与直驱风电机组之间的交互作用引发的次同步振荡。

4.1 H_∞ 混合灵敏度控制

图6为基于 H_∞ 混合灵敏度控制的独立控制通道2结构框图。图中: r_2 为参考输入信号; e_2 为跟踪误差信号; K_∞ 为待设计的鲁棒控制器; u_∞ 为鲁棒控制器输出的控制信号; G_{eq} 为鲁棒控制器 K_∞ 的被控对象; $\rho_1-\rho_3$ 为加权函数; $z=[z_1, z_2, z_3]^T$ 为评价输出信号。

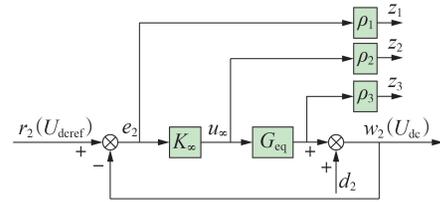


图6 基于 H_∞ 混合灵敏度控制的独立控制通道2结构框图

Fig.6 Block diagram of individual control channel 2 based on H_∞ mixed sensitivity control

本文将图3中的GSC电压外环 d 轴PI控制器 K_2 和控制通道中的 $g_{22}(1-\gamma h_1)$ 视为等效被控对象 G_{eq} ,则 G_{eq} 可表示为:

$$G_{eq} = K_2 g_{22} (1 - \gamma h_1) \quad (8)$$

定义灵敏度函数 S 、输入灵敏度函数 R 和补灵敏度函数 T 为^[20]:

$$\begin{cases} S = (1 + G_{eq} K_\infty)^{-1} = e_2 r_2^{-1} = w_2 d_2^{-1} \\ R = K_\infty (1 + G_{eq} K_\infty)^{-1} = u_\infty r_2^{-1} \\ T = G_{eq} K_\infty (1 + G_{eq} K_\infty)^{-1} = w_2 r_2^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

根据图6和式(9),参考输入信号 r_2 与评价输出信号 z 之间的关系可描述为:

$$\begin{cases} z_1 = \rho_1 e_2 = \rho_1 S r_2 \\ z_2 = \rho_2 u_\infty = \rho_2 R r_2 \\ z_3 = \rho_3 u_\infty G_{eq} = \rho_3 R G_{eq} r_2 = \rho_3 T r_2 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得 r_2 到 z 的闭环传递函数 Φ 为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \rho_1 S \\ \rho_2 R \\ \rho_3 T \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(9)和式(11)可知,灵敏度函数 S 为干扰信号 d_2 到输出信号 w_2 的传递函数,表征系统的抗干扰能力,通过调整其加权函数 ρ_1 即可增强系统的抗干扰性能;输入灵敏度函数 R 为参考输入信号 r_2 到控制信号 u_∞ 的传递函数,通过调整其加权函数 ρ_2 即可限制系统控制信号的大小;补灵敏度函数 T 为参考输入信号 r_2 到输出信号 w_2 的传递函数,表征系统的

鲁棒性能,通过调整其加权函数 ρ_3 即可提高系统的鲁棒稳定性。

H_∞ 混合灵敏度问题的实质是一个优化问题,即通过求取合适的鲁棒控制器 K_∞ ,使得系统在保持稳定的同时,满足 $\|\Phi\|_\infty$ 的最小值小于1。

4.2 加权函数的选择

观察式(9)可得 $S+T=1$,因此在相同频段内,不能同时满足系统的抗干扰性能和鲁棒性能,需要进行折中处理。

一般干扰信号多为低频信号,为增强系统的抗干扰性能,在低频段 S 的增益应尽可能小,即 ρ_1 的增益应尽可能大,具有低通特性。系统模型不确定性多存在于高频段,为避免因模型不确定性导致系统鲁棒性较差的问题,在高频段 T 的增益应尽可能小,即 ρ_3 的增益应尽可能大,具有高通特性。确定 ρ_1 与 ρ_3 后,可根据次同步振荡抑制效果调整 ρ_2 的大小,一般 ρ_2 取小于1的正实数。

基于上述对加权函数选取原则的描述,将 ρ_1 设计为一阶低通滤波器、 ρ_2 设计为一个小于1的正实数、 ρ_3 设计为一阶高通滤波器。经过多次调整,本文最终选取的权函数为:

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{150}{s+15} \\ \rho_2 = 0.4 \\ \rho_3 = \frac{s}{450} + 0.1 \end{cases} \quad (12)$$

ρ_1 与 ρ_3 的伯德图见附录C图C12。

4.3 H_∞ 鲁棒控制器的求解

利用MATLAB中的鲁棒控制工具箱,对求得的 H_∞ 鲁棒控制器进行降阶处理,最终得到的 H_∞ 鲁棒控制器为:

$$K_\infty = (7784s^3 + 1.084 \times 10^6 s^2 + 2.584 \times 10^8 s - 4.91 \times 10^9) / (s^4 + 2.778 \times 10^4 s^3 + 1.67 \times 10^7 s^2 + 3.302 \times 10^9 s + 2.994 \times 10^{11}) \quad (13)$$

在独立控制通道2中附加 H_∞ 鲁棒控制器后,独立控制通道1的开环传递函数 $C_{1\infty}$ 及干扰信号 $d_{1\infty}$ 如式(14)所示,独立控制通道2的开环传递函数 $C_{2\infty}$ 及干扰信号 $d_{2\infty}$ 如式(15)所示。

$$\begin{cases} C_{1\infty} = K_1 g_{11} (1 - \gamma h_{2\infty}) \\ d_{1\infty} = g_{12} g_{22}^{-1} h_{2\infty} \Delta r_2 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_{2\infty} = K_\infty K_2 g_{22} (1 - \gamma h_{1\infty}) \\ d_{2\infty} = g_{21} g_{11}^{-1} h_{1\infty} \Delta r_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $h_{2\infty} = K_\infty K_2 g_{22} / (1 + K_\infty K_2 g_{22})$ 。

5 仿真验证

在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建如附录A

图A1所示的含SVG的直驱风电并网系统仿真模型,系统模型参数及控制参数分别如附录A表A1和表A2所示。

5.1 验证直驱风机并网台数 n 对系统稳定性的影响

设置如下2个算例:Case 1为 $n=10$,4 s时投入SVG;Case 2为 $n=18$,4 s时投入SVG。2个算例的PCC有功功率波形如图7所示。

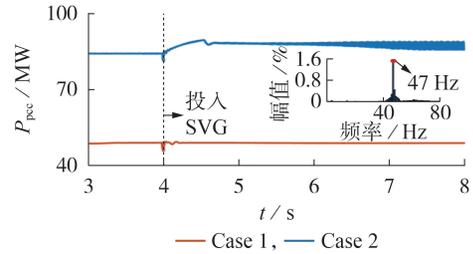


图7 n 变化时PCC有功功率波形

Fig.7 Waveform of PCC active power with variation of n

由图7可见:Case 1中,SVG投入前后系统保持稳定运行;Case 2中,SVG投入后系统发生振荡频率为47 Hz的次同步振荡,即随着直驱风机并网台数的增多,直驱风电机组与SVG之间的交互作用会引发次同步振荡,验证了3.2.1节基于ICAD理论对系统稳定性分析结果的正确性。

5.2 验证GSC电流内环 d 轴比例系数 K_{p2} 对系统稳定性的影响

设置如下2个算例:Case 3为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p2} 由0.5减小为0.2;Case 4为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p2} 由0.5减小为0.1。2个算例的PCC有功功率波形见附录C图C13。由图可知: K_{p2} 变化较小的Case 3中,系统保持稳定运行; K_{p2} 变化较大的Case 4中,系统发生次同步振荡。由此可知,当 K_{p2} 减小到一定数值时,直驱风电机组与SVG之间的交互作用会引发次同步振荡,验证了3.2.2节基于ICAD理论对系统稳定性分析结果的正确性。

5.3 验证SVG电压外环 d 轴比例系数 K_{p5} 对系统稳定性的影响

设置如下2个算例:Case 5为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p5} 由0.5减小为0.3;Case 6为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p5} 由0.5减小为0.2。2个算例的PCC有功功率波形见附录C图C14。由图可知: K_{p5} 变化较小的Case 5中,系统保持稳定运行; K_{p5} 变化较大的Case 6中,系统发生次同步振荡。由此可知,当 K_{p5} 减小到一定数值时,直驱风电机组与SVG之间的交互作用会引发次同步振荡,验证了3.2.3节基于ICAD理论对系统稳定性分析结果的正

确性。

5.4 验证SVG电流内环 d 轴比例系数 K_{p6} 对系统稳定性的影响

设置如下2个算例:Case 7为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p6} 由0.5减小为0.4;Case 8为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p6} 由0.5减小为0.3。2个算例的PCC有功功率波形见附录C图C15。由图可知, K_{p6} 变化较小的Case 7中,系统保持稳定运行; K_{p6} 变化较大的Case 8中,系统发生次同步振荡。由此可知,当 K_{p6} 减小到一定数值时,直驱风电机组与SVG之间的交互作用会引发次同步振荡,验证了3.2.4节基于ICAD理论对系统稳定性分析结果的正确性。

5.5 验证 H_{∞} 鲁棒控制器的有效性

为验证 H_{∞} 鲁棒控制器能够抑制由直驱风机并网台数和控制参数设置不合理引发的振荡,分别设置如下算例:Case 9为 $n=18$,4 s时投入SVG,7.5 s时投入 H_{∞} 鲁棒控制器;Case 10为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p2} 由0.5减小为0.1,7.5 s时投入 H_{∞} 鲁棒控制器;Case 11为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p5} 由0.5减小为0.2,7.5 s时投入 H_{∞} 鲁棒控制器;Case 12为 $n=10$,4 s时投入SVG,5.5 s时将 K_{p6} 由0.5减小为0.3,8.5 s时投入 H_{∞} 鲁棒控制器。上述算例的PCC有功功率波形如图8所示。

由图8可知,无论是直驱风机并网台数还是控制器参数设置不合理,投入 H_{∞} 鲁棒控制器后,振荡

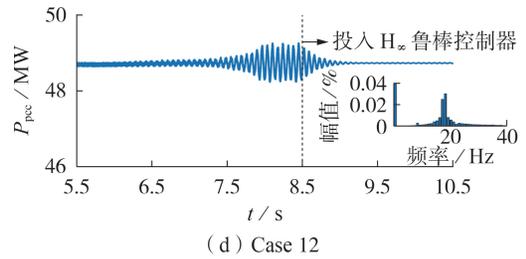


图8 H_{∞} 鲁棒控制器投入前后PCC有功功率波形
Fig.8 Waveform of PCC active power without and with H_{∞} robust controller

都逐渐衰减并进入稳态,由傅里叶分解结果可知,进入稳态运行后各次谐波含量较低,因此 H_{∞} 鲁棒控制器均能抑制由直驱风电机组与SVG之间的交互作用引发的次同步振荡,验证了基于 H_{∞} 鲁棒控制的振荡抑制策略的有效性。

6 结论

本文建立了含SVG的直驱风电并网系统小信号模型,基于特征值灵敏度分析筛选出对并网系统稳定性影响较显著的控制通道;然后基于ICAD理论对控制通道筛选后的系统进行稳定性分析,并且通过交互作用因子定量评估不同控制通道间的交互作用程度;为抑制控制通道间的交互作用引发的次同步振荡,提出了基于 H_{∞} 鲁棒控制的振荡抑制策略;最后通过仿真验证了基于ICAD理论的系统稳定性分析的正确性以及 H_{∞} 鲁棒控制器的有效性,得到了以下结论。

1)对于含SVG的直驱风电并网系统,对其小干扰稳定性影响较显著的控制通道为GSC的直流电压 d 轴控制回路以及SVG的直流电压 d 轴控制回路。

2)风电运行状况以及不合理的控制器参数将会影响SVG与直驱风电机组之间的交互作用,进而影响并网系统的小干扰稳定性:直驱风机并网台数越多、GSC电流内环 d 轴比例系数越小、SVG电压外环 d 轴比例系数越小、SVG电流内环 d 轴比例系数越小,SVG与直驱风电机组之间的交互作用越强,并网系统越趋于不稳定。

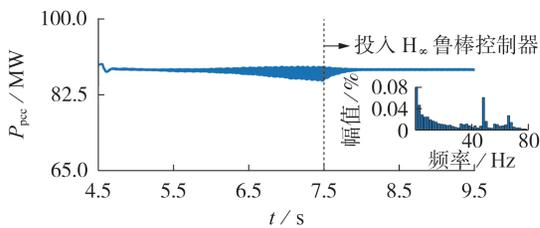
3)本文所设计的基于 H_{∞} 鲁棒控制的振荡抑制策略适应性强,能够有效抑制由不同影响因素引发的次同步振荡。

本文所做工作为研究SVG与直驱风电并网系统稳定性及次同步振荡抑制策略提供了新思路。

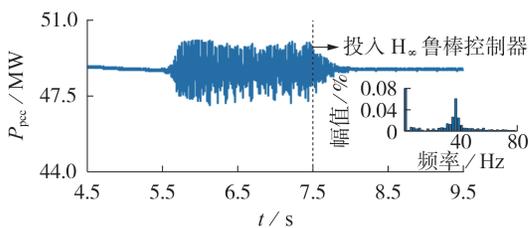
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

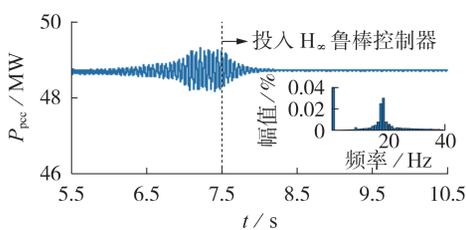
- [1] 曹宇平. 风电次同步振荡机理研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.



(a) Case 9



(b) Case 10



(c) Case 11

- CAO Yuping. Study on the mechanism of sub-synchronous oscillation caused by wind power[D]. Beijing:North China Electric Power University,2019.
- [2] 马静,沈雅琦,杜延菱,等. 适应宽频振荡的风电并网系统主动阻尼技术综述[J]. 电网技术,2021,45(5):1673-1686.
MA Jing, SHEN Yaqi, DU Yanling, et al. Overview on active damping technology of wind power integrated system adapting to broadband oscillation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1673-1686.
- [3] 郭玲秀,王维庆,王海云,等. 基于STATCOM的大规模双馈风电场次同步振荡研究[J]. 可再生能源,2019,37(8):1165-1170.
GUO Lingxiu, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on the subsynchronous oscillation of large-scale doubly-fed wind farm based on STATCOM[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(8):1165-1170.
- [4] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2366-2372.
- [5] 刘宇明,黄碧月,孙海顺,等. SVG与直驱风机间的次同步相互作用特性分析[J]. 电网技术,2019,43(6):2072-2079.
LIU Yuming, HUANG Biyu, SUN Haishun, et al. Study on subsynchronous interaction between D-PMSG-based wind turbines and SVG[J]. Power System Technology, 2019, 43(6):2072-2079.
- [6] 朱林,钟丹婷,王贝,等. 含转子侧控制器的双馈风机建模与次同步振荡机理分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(13):40-48.
ZHU Lin, ZHONG Danting, WANG Bei, et al. Modeling of doubly-fed wind turbine with rotor-side converter control and mechanism analysis of subsynchronous oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13):40-48.
- [7] 薛安成,吴雨,王子哲,等. 双馈风电场外送系统的中频振荡机理及其影响因素分析[J]. 电网技术,2019,43(4):1245-1254.
XUE Ancheng, WU Yu, WANG Zizhe, et al. Mechanism and influencing factor analysis of medium frequency oscillation in sending power system connected with DFIG wind farms[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1245-1254.
- [8] 张畅,孙龙庭,陈新,等. 集成静止无功发生装置的直驱风场序阻抗网络模型与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(9):2877-2891.
ZHANG Yang, SUN Longting, CHEN Xin, et al. Sequence impedance network model and stability analysis for direct-drive wind farm with static var generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9):2877-2891.
- [9] 周佩朋,李光范,宋瑞华,等. 直驱风机与静止无功发生器的次同步振荡特性及交互作用分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4369-4378,4637.
ZHOU Peipeng, LI Guangfan, SONG Ruihua, et al. Subsynchronous oscillation characteristics and interactions of direct drive permanent magnet synchronous generator and static var generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15):4369-4378,4637.
- [10] LIU Hanchao, SUN Jian. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):1181-1189.
- [11] 邢法财,武诚,蒋哲,等. 计及网络谐振结构的双馈风电场次同步振荡问题分析及抑制[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):47-54.
XING Facai, WU Cheng, JIANG Zhe, et al. Analysis and suppression on sub-synchronous oscillation problems of DFIG-based wind farm considering network resonance structure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8):47-54.
- [12] LIU Huakun, XIE Xiaorong, LI Yu, et al. Damping subsynchronous resonance in series-compensated wind farms by adding notch filters to DFIG controllers [C]//2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia(ISGT ASIA). Bangkok, Thailand: IEEE, 2015:1-5.
- [13] ANDRES E L, JORGE A S. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):419-428.
- [14] 李浩志,李景一,杨建军,等. 抑制风电-柔直外送系统次同步振荡的并联VSC型次同步阻尼控制器[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):133-139.
LI Haozhi, LI Jingyi, YANG Jianjun, et al. Shunt-VSC subsynchronous damping controller to suppress SSO in wind power connected by flexible DC sending system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8):133-139.
- [15] 高本锋,易友川,邵冰冰,等. 基于自抗扰控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):148-157.
GAO Benfeng, YI Youchuan, SHAO Bingbing, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on ADRC for D-PMSGs based wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9):148-157.
- [16] 刘涛,宋新立,汤涌,等. 特征值灵敏度方法及其在电力系统小干扰稳定分析中的应用[J]. 电网技术,2010,34(4):82-87.
LIU Tao, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Eigenvalue sensitivity and its application in power system small signal stability [J]. Power System Technology, 2010, 34(4):82-87.
- [17] 刘炜,郭春义,赵成勇. 混合双馈入直流输电控制系统交互影响机理分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(13):3757-3766.
LIU Wei, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. Mechanism analysis of control interactions in dual-infeed hybrid HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3757-3766.
- [18] O'REILLY J, LEITHEAD W E. Multivariable control by 'individual channel design' [J]. International Journal of Control, 1991, 54(1):1-46.
- [19] 张芳,姚文鹏,张紫菁. 基于广义特征根的MMC-HVDC系统高频振荡分析及抑制策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):174-183.
ZHANG Fang, YAO Wenpeng, ZHANG Zijing. High-frequency oscillation analysis and suppression strategy of MMC-HVDC system based on generalized eigenvalue [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8):174-183.
- [20] 孙天一,李保宏,江琴,等. 基于多类型换流设备的受端电网耦合鲁棒阻尼控制策略[J/OL]. 电力自动化设备. (2023-07-06) [2023-12-02]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202306021>.

作者简介:

张芳(1972—),女,副研究员,博士,主要研究方向为柔性高压直流输电及电力系统稳定性分析与控制(E-mail: zhangfang@tju.edu.cn);

王赫(1998—),女,硕士研究生,研究方向为直驱风电并网系统稳定性及抑制(E-mail: chichichichi@tju.edu.cn);

李传栋(1979—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析及规划。

(编辑 李莉)

(下转第17页 continued on page 17)

Controllable scenario generation method based on improved conditional generative adversarial network

ZHANG Shuai¹, LIU Wenxia¹, WAN Haiyang¹, LÜ Xiaoying¹, MAHATO N K¹, LU Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Economic and Technical Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130022, China)

Abstract: The renewable energy generation has strong randomness and volatility, in order to achieve efficient and reliable scenario modelling, a controllable scenario generation method based on an improved conditional generative adversarial network is proposed. A scenario generation framework based on the conditional generative adversarial network is proposed. Combining the global attention mechanism of Transformer and the local generalization mechanism of conventional convolution and depth-separable convolution, a network structure suitable for extracting different dimensional features of the renewable energy generation is designed. The conditional generative adversarial network model is used to establish the mapping relationship between the low-dimensional meteorological feature latent space and the high-dimensional renewable energy generation data, a generation method of the controllable scenario is proposed, and four generation strategies of random scenario generation, scenario reduction, extreme scenario generation and continuous daily scenario generation are established. The simulative results based on the actual photovoltaic, wind power data and meteorological data show that the proposed model and method can effectively learn the randomness, timing, fluctuation and spatial correlation of renewable energy generation, and realize the controllable generation of scenarios under different strategies.

Key words: scenario generation; conditional generative adversarial network; feature extraction; distribution network; controllable generation

(上接第 8 页 continued from page 8)

Stability analysis and oscillation suppression strategy of direct-drive wind power grid-connected system with static var generator

ZHANG Fang¹, WANG He¹, LI Chuandong²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of Fujian Provincial Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: Most of the stability analysis and oscillation suppression strategies of wind power grid-connected system focus on wind farm itself, but less research is implemented for direct-drive wind power grid-connected system with static var generator (SVG). The control channels that have a significant impact on the stability of grid-connected system are screened out based on eigenvalue sensitivity. The grid-connected system is equivalently split into multiple single-input single-output (SISO) control channels from a multi-input multi-output (MIMO) coupled system based on the individual channel analysis and design (ICAD) theory. The stability of the grid-connected system stability is analyzed qualitatively while the interaction between different control channels is evaluated quantitatively. A sub-synchronous oscillation suppression strategy based on H_∞ robust control is proposed to suppress the interaction between control channels. Through electromagnetic transient simulation, the correctness of the grid-connected system stability analysis based on the ICAD theory and the effectiveness of the sub-synchronous oscillation suppression strategy based on H_∞ robust control are verified.

Key words: direct-drive wind turbines; static var generator; individual channel; H_∞ robust control; oscillation suppression

附录 A

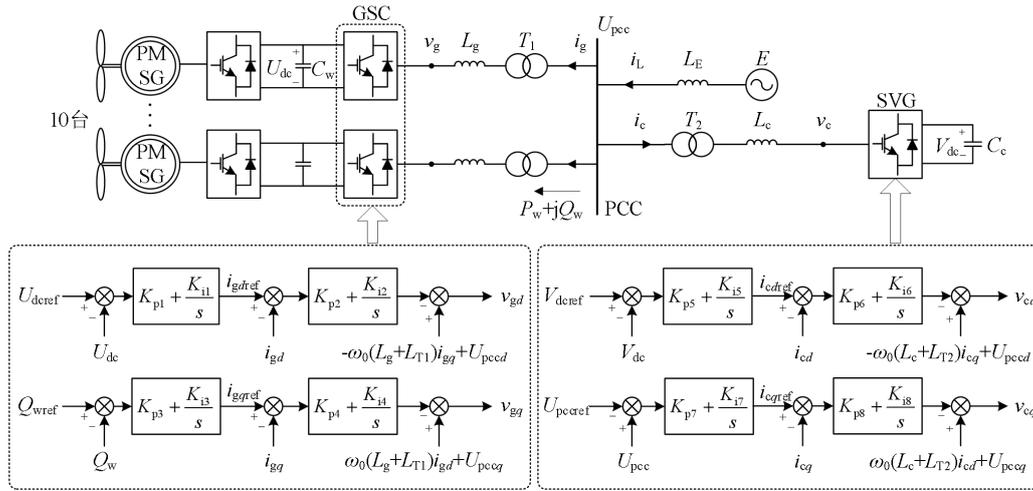


图 A1 含 SVG 的直驱风电并网系统及其控制框图

Fig.A1 Direct-drive wind power grid-connected system with SVG and its control block diagram

图 A1 中： i_g 、 i_c 、 i_L 分别为流经 GSC、SVG 和外部交流系统的电流； v_g 和 v_c 分别为 GSC 和 SVG 的端口电压； U_{pcc} 为 PCC 电压； P_w+jQ_w 为直驱风机吸收的复功率。

表 A1 含 SVG 的直驱风电并网系统参数

Table A1 Parameters of direct-drive wind power grid-connected system with SVG

参数	数值
GSC 相电抗器电感 L_g /mH	0.2
GSC 直流电容 C_w /μF	25000
GSC 直流侧电压 U_{dc} /kV	1.45
SVG 相电抗器电感 L_c /mH	0.057
SVG 直流电容 C_c /μF	30000
SVG 直流侧电压 V_{dc} /kV	1.45
变压器 T_1 额定容量 S_{TN1} /(MV·A)	5.8
变压器漏抗 X_{T1}	0.08
变压器 T_2 额定容量 S_{TN2} /(MV·A)	12.5
变压器漏抗 X_{T2}	0.08
输电线路电感 L_E /mH	19.5

表 A2 含 SVG 的直驱风电并网系统控制器参数

Table A2 Controller parameters of direct-drive wind power grid-connected system with SVG

控制器	参数
GSC 直流电压外环 d 轴控制	$K_{p1}=4, K_{i1}=50$
GSC 电流内环 d 轴控制	$K_{p2}=0.5, K_{i2}=100$
GSC 无功外环 q 轴控制	$K_{p3}=0.5, K_{i3}=50$
GSC 电流内环 q 轴控制	$K_{p4}=0.5, K_{i4}=100$
SVG 直流电压外环 d 轴控制	$K_{p5}=0.5, K_{i5}=50$
SVG 电流内环 d 轴控制	$K_{p6}=0.5, K_{i6}=20$
SVG 交流电压外环 q 轴控制	$K_{p7}=1, K_{i7}=50$
SVG 电流内环 q 轴控制	$K_{p8}=0.5, K_{i8}=20$

直驱风机的 GSC、SVG 以及外部交流系统的数学模型如式(A1)—(A11)所示。式中： L_{T1} 和 L_{T2} 分别为变压器 T_1 和 T_2 的漏感； i_{gd} 、 i_{gq} 、 i_{gdref} 、 i_{gqref} 分别为流经 GSC 的电流 i_g 的 d 、 q 轴分量及其对应的参考值； i_{cd} 、 i_{cq} 、 i_{cdref} 、 i_{cqref} 分别为流经 SVG 的电流 i_c 的 d 、 q 轴分量及其对应的参考值； v_{gd} 、 v_{gq} 、 v_{cd} 、 v_{cq} 分别为 GSC 和 SVG 的端口电压 v_g 、 v_c 的 d 、 q 轴分量； U_{pccd} 、 U_{pccq} 、 U_{pccref} 分别为 PCC 电压的 d 、 q 轴分量和参考值； U_{dcref} 、 V_{dcref} 分别为 GSC 和 SVG 直流电压的参考值； E_d 、 E_q 分别为 35kV 交流电网等效电压的 d 、 q 轴分量； Q_{wref} 为直驱风机吸收无功功率的参考值； P_s 为直驱风机机侧部分输送至直流电容的有功功率； x_1 — x_8 为积分环节引入的中间变量； ω_0 为交流系统额定角频率； n 为直驱风机并网台数。

1) GSC 数学模型。

$$\begin{cases} (L_g + L_{T1}) \frac{di_{gd}}{dt} = U_{pccd} - v_{gd} - \omega_0 (L_g + L_{T1}) i_{gq} \\ (L_g + L_{T1}) \frac{di_{gq}}{dt} = U_{pccq} - v_{gq} + \omega_0 (L_g + L_{T1}) i_{gd} \end{cases} \quad (A1)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = U_{dcref} - U_{dc} \quad (A2)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = i_{gdref} - i_{gd} \\ C_w U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (v_{gd} i_{gd} + v_{gq} i_{gq}) + P_s \\ v_{gd} = -K_{p2} (i_{gdref} - i_{gd}) - K_{i2} x_2 - \omega_0 (L_g + L_{T1}) i_{gq} + U_{pccd} \end{cases} \quad (A3)$$

$$i_{gdref} = K_{p1} (U_{dcref} - U_{dc}) + K_{i1} x_1 \quad (A4)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = Q_{wref} - Q_w \\ \frac{dx_4}{dt} = i_{gqref} - i_{gq} \\ Q_w = \frac{3}{2} (U_{pccd} i_{gq} - U_{pccq} i_{gd}) \\ i_{gqref} = K_{p3} (Q_{wref} - Q_w) + K_{i3} x_3 \\ v_{gq} = -K_{p4} (i_{gqref} - i_{gq}) - K_{i4} x_4 + \omega_0 (L_g + L_{T1}) i_{gd} + U_{pccq} \end{cases} \quad (A5)$$

2) SVG 数学模型。

$$\begin{cases} (L_c + L_{T2}) \frac{di_{cd}}{dt} = U_{pccd} - v_{cd} - \omega_0 (L_c + L_{T2}) i_{cq} \\ (L_c + L_{T2}) \frac{di_{cq}}{dt} = U_{pccq} - v_{cq} + \omega_0 (L_c + L_{T2}) i_{cd} \end{cases} \quad (A6)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = V_{dcref} - V_{dc} \quad (A7)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_6}{dt} = i_{cdref} - i_{cd} \\ C_c V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (v_{cd} i_{cd} + v_{cq} i_{cq}) \\ v_{cd} = -K_{p6} (i_{cdref} - i_{cd}) - K_{i6} x_6 - \omega_0 (L_c + L_{T2}) i_{cq} + U_{pccd} \end{cases} \quad (A8)$$

$$i_{cdref} = K_{p5} (V_{dcref} - V_{dc}) + K_{i5} x_5 \quad (A9)$$

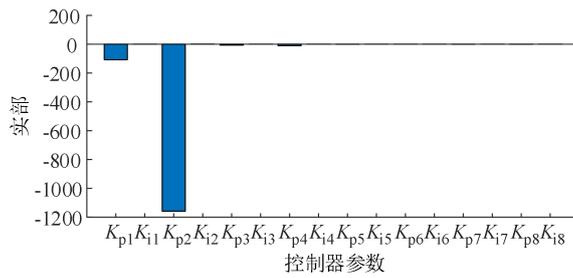
$$\begin{cases} \frac{dx_7}{dt} = U_{pcc} - U_{pccref} \\ \frac{dx_8}{dt} = i_{cqref} - i_{cq} \\ U_{pcc} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \sqrt{U_{pccd}^2 + U_{pccq}^2} \\ i_{cqref} = K_{p7} (U_{pcc} - U_{pccref}) + K_{i7} x_7 \\ v_{cq} = -K_{p8} (i_{cqref} - i_{cq}) - K_{i8} x_8 + \omega_0 (L_c + L_{T2}) i_{cd} + U_{pccq} \end{cases} \quad (A10)$$

3) 外部交流系统数学模型。

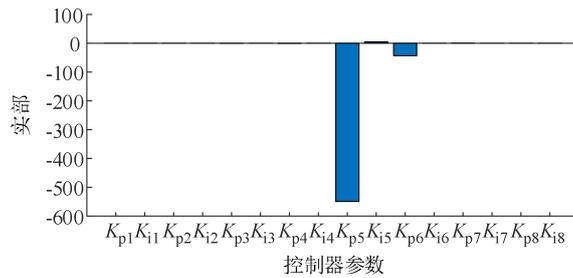
$$\begin{cases} U_{pccd} = E_d - \omega_0 L_E (ni_{gq} + i_{cq}) \\ U_{pccq} = E_q + \omega_0 L_E (ni_{gd} + i_{cd}) \end{cases} \quad (A11)$$

将上述模型汇总，在平衡点处线性化就构成了式(1)所示的状态空间模型，其状态变量 $\Delta \mathbf{x}_{all} = [\Delta i_{gd}, \Delta i_{gq}, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta U_{dc}, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta i_{cd}, \Delta i_{cq}, \Delta x_5, \Delta x_6, \Delta V_{dc}, \Delta x_7, \Delta x_8]^T$ 。

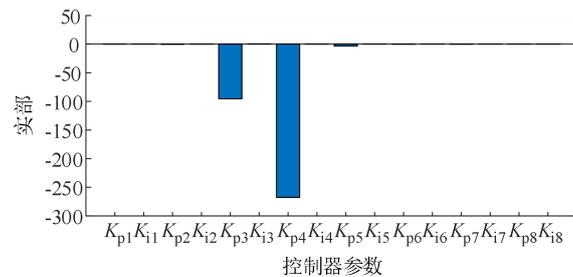
附录 B



(a) 振荡模式 $\lambda_{1,2}$ 下各控制器参数特征值灵敏度的实部



(b) 振荡模式 $\lambda_{3,4}$ 下各控制器参数特征值灵敏度的实部



(c) 振荡模式 $\lambda_{5,6}$ 下各控制器参数特征值灵敏度的实部

图 B1 阻尼比较小的 3 组振荡模式下各控制器参数特征值灵敏度的实部

Fig.B1 Real part of eigenvalue sensitivity of controller parameters for three low damping ratios oscillation modes

图2中被控对象 $G(s)$ 的建立过程如下：去除附录A中GSC和SVG控制系统模型中的 q 轴控制、GSC的 d 轴电压外环控制和SVG的 d 轴电压外环控制对应的变量和方程，即取式(A1)、(A3)、(A6)、(A8)、(A11)，在平衡点处线性化并消去代数变量构成的状态空间模型为：

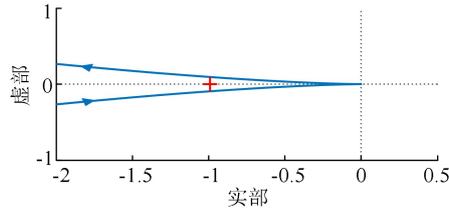
$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta w = C\Delta x + D\Delta u \end{cases} \quad (B1)$$

式中：状态变量 $\Delta x = [\Delta i_{gd}, \Delta i_{gq}, \Delta x_2, \Delta U_{dc}, \Delta i_{cd}, \Delta i_{cq}, \Delta x_6, \Delta V_{dc}]^T$ 。

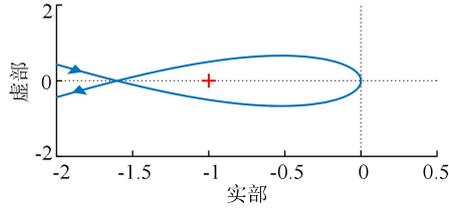
对式(B1)进行 Laplace 变换并消去状态变量 Δx ，得到被控对象的传递函数矩阵为：

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (B2)$$

附录 C



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

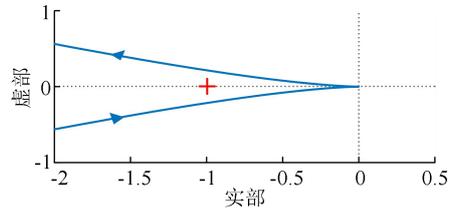
图 C1 $n=18$ 时 2 个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C1 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $n=18$

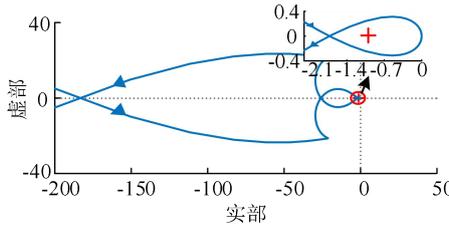
表 C1 $n=18$ 时的 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C1 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $n=18$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	0	0	是
通道 2	4	2	2	否



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

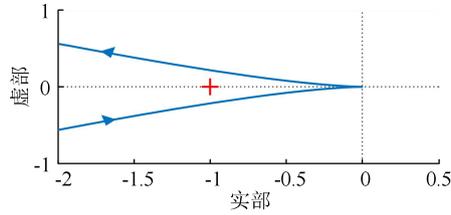
图 C2 $K_{p2}=0.2$ 时 2 个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C2 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $K_{p2}=0.2$

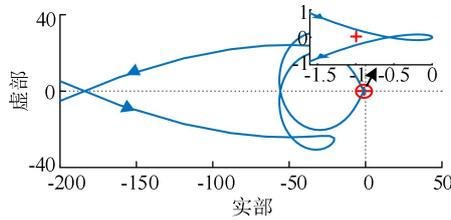
表 C2 $K_{p2}=0.2$ 时 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C2 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $K_{p2}=0.2$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	0	0	是
通道 2	2	2	0	是



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

图 C3 $K_{p2}=0.1$ 时 2 个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C3 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $K_{p2}=0.1$

表 C3 $K_{p2}=0.1$ 时 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C3 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $K_{p2}=0.1$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	0	0	是
通道 2	2	0	2	否

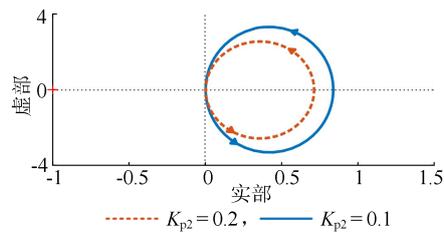
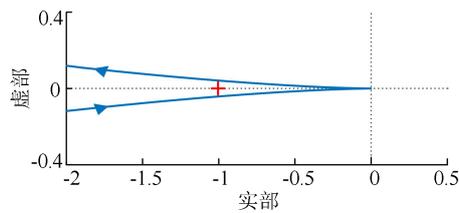
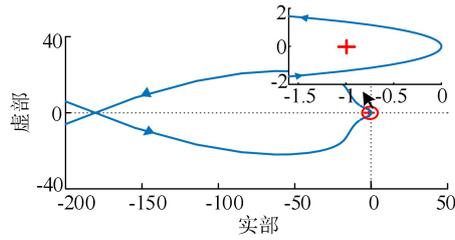


图 C4 K_{p2} 变化时 γ 的 Nyquist 曲线

Fig.C4 Nyquist plots of γ with the variation of K_{p2}



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

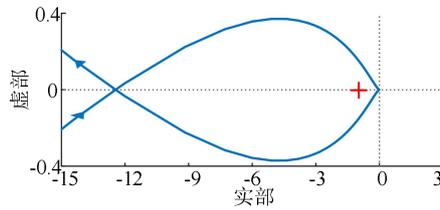
图 C5 $K_{p5}=0.3$ 时 2 个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C5 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $K_{p5}=0.3$

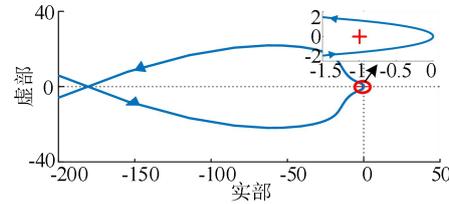
表 C4 $K_{p5}=0.3$ 时 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C4 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $K_{p5}=0.3$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	0	0	是
通道 2	2	2	0	是



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

图 C6 $K_{p5}=0.2$ 时两个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C6 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $K_{p5}=0.2$

表 C5 $K_{p5}=0.2$ 时 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C5 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $K_{p5}=0.2$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	-2	2	否
通道 2	2	2	0	是

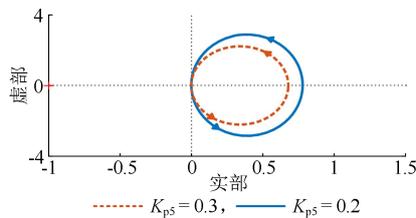
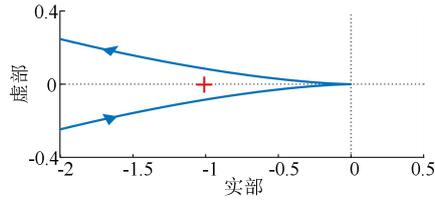
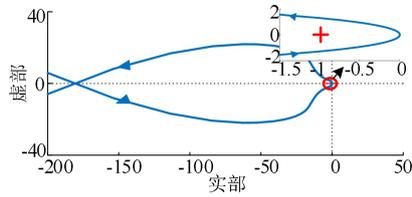


图 C7 K_{p5} 变化时 γ 的 Nyquist 曲线

Fig.C7 Nyquist plots of γ with variation of K_{p5}



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

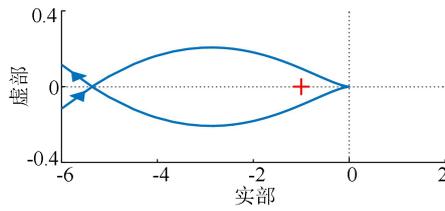
图 C8 $K_{p6}=0.4$ 时 2 个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C8 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $K_{p6}=0.4$

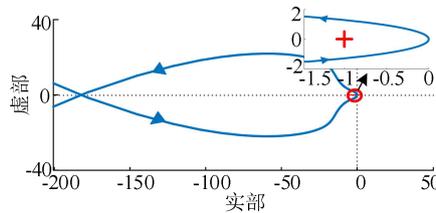
表 C6 $K_{p6}=0.4$ 时 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C6 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $K_{p6}=0.4$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	0	0	是
通道 2	2	2	0	是



(a) 独立控制通道 1 的 Nyquist 曲线



(b) 独立控制通道 2 的 Nyquist 曲线

图 C9 $K_{p6}=0.3$ 时 2 个等效独立控制通道的 Nyquist 曲线

Fig.C9 Nyquist plots of two equivalent individual control channels with $K_{p6}=0.3$

表 C7 $K_{p6}=0.3$ 时 2 个等效独立控制通道稳定性分析

Table C7 Stability analysis of two equivalent individual control channels with $K_{p6}=0.3$

等效独立控制通道	p	N	z	是否稳定
通道 1	0	-2	2	否
通道 2	2	2	0	是

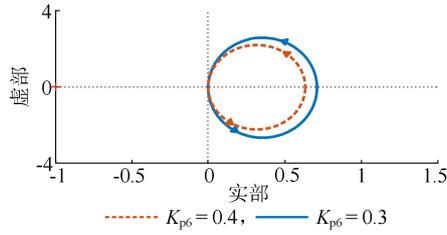
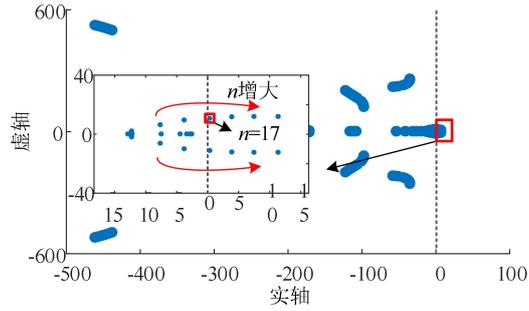
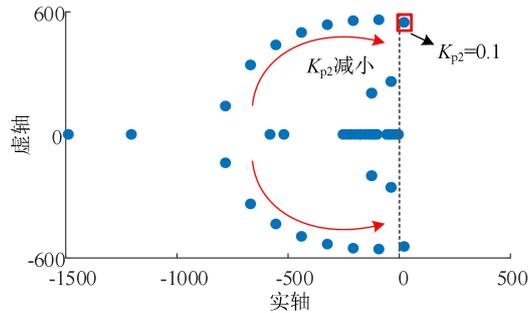


图 C10 K_{p6} 变化时 γ 的 Nyquist 曲线

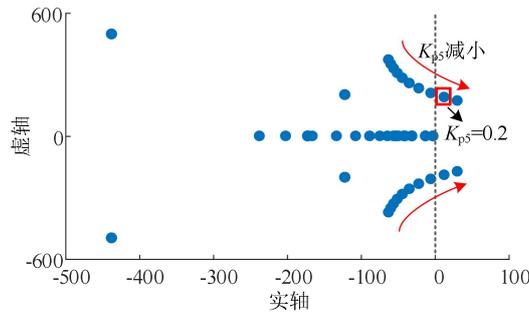
Fig.C10 Nyquist plots for γ with variation of K_{p6}



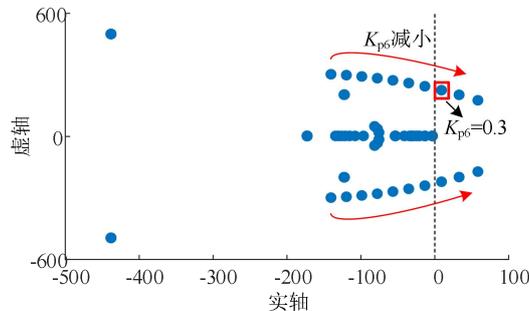
(a) 直驱风机并网台数变化时的根轨迹



(b) K_{p2} 变化时的根轨迹



(c) K_{p5} 变化时的根轨迹



(d) K_{p6} 变化时的根轨迹

图 C11 直驱风机并网台数及控制器参数变化时根轨迹

Fig.C11 Root locus with variation of number of grid-connected direct-drive wind turbines and controller parameters

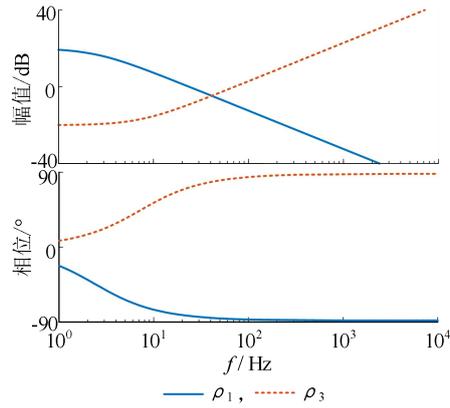


图 C12 加权函数 ρ_1 与 ρ_3 的伯德图

Fig.C12 Bode diagram of weighting functions ρ_1 and ρ_3

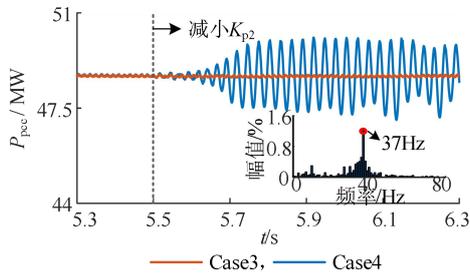


图 C13 K_{p2} 变化时 PCC 有功功率波形

Fig.C13 Waveform of PCC active power with variation of K_{p2}

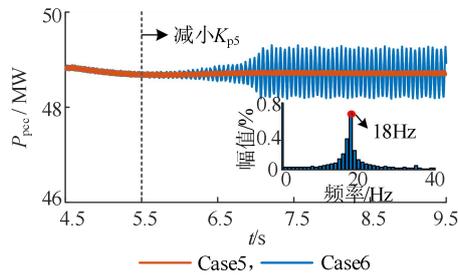


图 C14 K_{p5} 变化时 PCC 有功功率波形

Fig.C14 Waveform of PCC active power with variation of K_{p5}

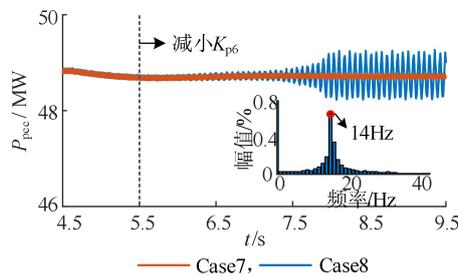


图 C15 K_{p6} 变化时 PCC 有功功率波形

Fig.C15 Waveform of PCC active power with variation of K_{p6}